

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

VALENTINO VITKOVIĆ

*Ubrzanje vremenskog toka slijeganja tla korištenjem
šljunčanih pilota*

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

*Ubrzanje vremenskog toka slijeganja tla korištenjem
šljunčanih pilota*

KANDIDAT:

VALENTINO VITKOVIĆ

MENTOR:

doc. dr. sc. KREŠO IVANDIĆ

VARAŽDIN, 2016.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

UBRZANJE VREMENSKOG TOKA SLIJEGANJA TLA KORIŠTENJEM
ŠLJUNČANIH PILOTA

(naslov rada)

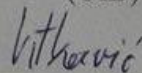
rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom Izv. Prof. dr. sc. Krešo Ivandić dipl. ing. građ.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 29.6.2016.

Valentino Vitković
(Ime i prezime)

71930642909
(OIB)



(Vlastoručni potpis)

Sažetak

AUTOR: Valentino Vitković

TEMA: Ubrzanje vremenskog toka slijeganja tla korištenjem
šljunčanih pilota

KLJUČNE RIJEČI: konsolidacija, vremenski tok slijeganja, šljunčani piloti,
ubrzanje slijeganja

Diplomski rad počinje s problemom konsolidacije, opisujemo kako možemo rješenje dobiti analitičkim putem (Terzaghijeva teorija 1D konsolidacije). Slijedi poglavlje o metodama određivanja koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla, laboratorijskim i terenskim metodama sa prikazanim pripadajućim izrazima za izračun. Rad dalje opisuje tehnologiju izvođenja šljunčanih pilota koja obuhvaća načine ugradnje, kontrole, opažanja i projektiranje rasporeda i razmaka šljunčanih pilota u općenitom slučaju. Peta cjelina opisuje dva projekta poboljšanja tla u smislu ubrzanja slijeganja, jedan je projekt u Rugvici te je dan proračun slijeganja bez poboljšanja i nakon poboljšanja, a drugi je projekt luke Ploče, gdje se poboljšanje izvodilo na lokaciji budućeg objekta zgrade lučke uprave i parkirališta. U posljednjem poglavlju prikazan je proračun slijeganja tla na lokaciji TS Sisak i proračun ubrzanja slijeganja metodom konačnih diferencija.

SADRŽAJ RADA:

1. Uvod.....	1
2. Konsolidacija tla	2
2.1. Općenito o problemu vremenskog toka slijeganja tla	2
2.2. Proces konsolidacije tla	2
2.3. Terzaghijeva teorija jednodimenzionalne konsolidacije	5
2.3.1. Osnovne pretpostavke	5
2.3.2. Rješenje jednodimenzionalne konsolidacije	6
2.3.3. Rješenje jednadžbe jednodimenzionalne konsolidacije	9
2.3.4. Stupanj konsolidacije	11
2.4. Radijalna konsolidacija	13
3. Određivanje vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla	17
3.1. Laboratorijske metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla	17
3.1.1. Metoda s promjenjivim padom potencijala	17
3.1.2. Metoda zadanog protoka	19
3.2. Terenske metode	20
3.2.1. Crpljenje iz bunara	21
4. Općenito o tehnologiji izvedbe šljunčanih pilota	22
4.1. Općenito o postupku dubinskog vibracijskog zbijanja	22
4.2. Postupak dubinskog vibracijskog zbijanja u nevezanom tlu	23
4.3. Postupak dubinskog vibracijskog zbijanja u vezanom i mješovitom tlu ..	25
4.4. Kontrola postupka dubinskog vibracijskog zbijanja	26
4.4.1. Kontrola kvalitete izvedbe šljunčanih pilota	27
4.5. Tehnička promatranja	29
4.6. Projektiranje šljunčanih pilota	31

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja.....	33
5.1. Projekt Rugvica.....	33
5.1.1. Redoslijed izvođenja radova.....	34
5.1.2. Geostatički proračuni.....	35
5.1.3. Temeljne stope.....	35
5.1.4. Temeljna traka.....	38
5.2. Projekt luka Ploče.....	42
5.2.1. Zgrada lučke uprave.....	42
5.2.2. Parkiralište.....	49
6. Proračun ubrzanja vremenskog toka slijeganja na projektu TS Sisak.....	55
6.1. Opis tehničkog rješenja.....	55
6.2. Proračun vremenskog toka slijeganja.....	57
6.3. Proračun ubrzane konsolidacije.....	59
7. Zaključak.....	62
Literatura.....	64
Popis slika.....	65
Popis tablica.....	66
Grafički prilozi.....	67

1. Uvod

Svrha ovog diplomskog rada je prikaz problematike vremenskog toka slijeganja tla te mogućnosti njegovim upravljanjem u inženjerskoj praksi. Cilj nam je prikazati metode poboljšanja tla u smislu ubrzanja slijeganja i povećanja stabilnosti te inženjerskim alatima odrediti ubrzanje vremenskog toka slijeganja tla korištenjem šljunčanih pilota na lokaciji.

Naša lokacija je TRAFO stanica Sisak gdje je prethodnim ispitivanjima vremenskog toka slijeganja koja su imala cilj ocijeniti da li je vremensko razdoblje konsolidacije u okvirima projekta, utvrđeno da je za 80% konsolidaciju slabije propusnih slojeva gline i organske gline potrebno 5 – 6 godina. To je neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje, zbog kojega je potrebno iznaći rješenje za ubrzanje slijeganja i/ili ojačanje tla. Rješenje je izvedba šljunčanih pilota.

Rad se sastoji od dva veća dijela. Prvi dio je teorijski i obuhvaća poglavlje o problemu konsolidacije, teoriji jednodimenzionalne konsolidacije, određivanje koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla. Drugi dio je praktični te obuhvaća poglavlje o tehnologiji izvođenja šljunčanih pilota, poglavlje primjena šljunčanih pilota kod sanacija temeljnog tla odnosno ubrzanja slijeganja te proračun ubrzanja vremenskog toka slijeganja tla na lokaciji TRAFO stanica Sisak.

2. Konsolidacija tla

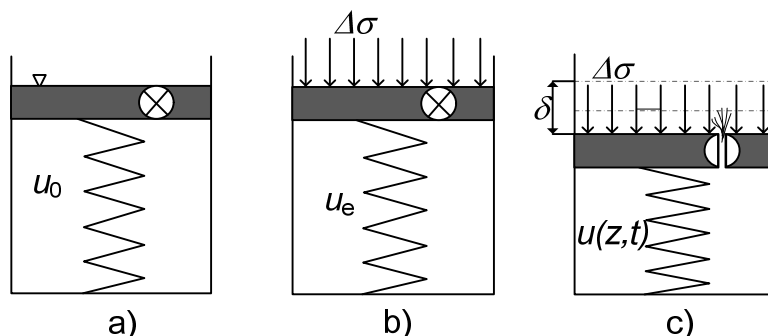
2.1. Općenito o problemu vremenskog toka slijeganja tla

Promatramo li ponašanje sitnozrnatog, zasićenog tla kao što je glina izloženo promjeni opterećenja $\Delta\sigma$, primjećujemo da se u takvim uvjetima slijeganje odvija sve dok višak vode ne drenira u okolno tlo. Zbog promjene opterećenja nekog područja mijenja se stanje naprezanja u tlu i sam volumen uz odgovarajuće slijeganje površine. Promijenjeno stanje naprezanja izaziva najprije promjene pornog tlaka ne utječući na efektivna naprezanja (Nonveiller, 1979). Promjene efektivnih naprezanja, a time i deformacije, mogu nastati tek pošto se promijeni porni tlak. Kad se porni tlak zbog promjene stanja naprezanja izjednači sa stacionarnim hidrauličkim poljem u podzemnoj vodi, završit će se i proces slijeganja (Nonveiller, 1979). Postepeno smanjivanje pornog predtlaka i porasta slijeganja do njegove konačne veličine naziva se procesom konsolidacije tla.

2.2. Proces konsolidacije tla

Proces konsolidacije tla možemo ilustrirati jednostavnim primjerom opruge u posudi s vodom (slika 1a). Posuda ima porozni klip s ventilom. Opteretimo je dok je ventil zatvoren (nedrenirani uvjeti). Voda u posudi, koja simulira vodu u porama tla, preuzima ukupno vanjsko opterećenje $\Delta\sigma$, a opruga, koja simulira skelet tla, ne miče se (slika 1b). Kada otvorimo ventil voda će početi istjecati iz posude, brže ako je ventil više otvoren, sporije ako je otvoren manje, što znači da ventil simulira propusnost tla (slika 1c). Tlak vode u posudi tijekom ovog procesa se smanjuje, opruga preuzima isti dio vanjskog opterećenja za koji se tlak vode smanjio i opruga se skraćuje. Ovo traje dok

voda ne prestane istjecati iz posude, što znači da u njoj više nema viška tlaka vode i da je opruga preuzela ukupno vanjsko opterećenje te se više ne miče.



Slika 1. Mehanički model konsolidacije

Budući da je voda znatno manje stišljiva od mineralnog skeleta tla, voda u tlu preuzima ukupno vanjsko opterećenje i stvara se takozvani višak tlaka (porni predtlak) vode $u_e = \Delta\sigma$ u odnosu na tlak vode prije opterećenja tla u_0 , u svim točkama po visini tla, tako da je sada tlak vode

$$u(z,0) = u_0(z,0) + u_e(z,0) = u_0(z,0) + \Delta\sigma$$

gdje je z vertikalna koordinata, od površine tla usmjerena prema dolje, a druga vrijednost u zagradama označava početno vrijeme $t = 0$.

S vremenom voda istječe iz tla brzinom koja ovisi o veličini koeficijenta propusnosti i hidrauličkog gradijenta. Istjecanje vode iz pora omogućava smanjenje njihova volumena i ostvarenje odgovarajuće deformacije (slijeganja tla). Pri tom se smanjuje veličina viška tlaka vode, a za isti se iznos povećava efektivno naprezanje u tlu. Dakle,

$$u(z,t) = u_0(z,0) + u_e(z,0) - \Delta u_e(z,t)$$

$$\sigma'(z,t) = \sigma'(z,0) + \Delta\sigma'(z,t)$$

$$\Delta\sigma'(z,t) = \Delta u_e(z,t)$$

Trajanje ovog procesa u vremenu zove se konsolidacijom tla. Kako se tlak vode u tlu mijenja u vremenu, radi se o nestacionarnom strujanju vode. Ovaj proces završava kada višak tlaka vode padne na nulu, a skelet tla preuzme cijelo vanjsko opterećenje, odnosno efektivno naprezanje naraste za ukupnu vrijednost vanjskog opterećenja. Završetak ovako definiranog procesa konsolidacije označit ćemo vremenom t_{EOP} (indeks označava kraj primarne konsolidacije, *End of Primary*). Tada je

$$u_e(z, t_{\text{EOP}}) = 0$$

$$u(z, t_{\text{EOP}}) = u_0(z, 0)$$

$$\sigma'(z, t_{\text{EOP}}) = \sigma'(z, 0) + \Delta\sigma$$

Smanjenje volumena tla nastaje zbog postepenog porasta efektivnih naprežanja u toku konsolidacije. To smanjenje volumena uz postepen pad pornog tlaka i porast efektivnih naprežanja u skeletu tla nazivamo primarna konsolidacija. Nakon završetka primarne konsolidacije, kada je istisnuta sva voda iz pora tla, nastavlja se konsolidacija na račun postupene plastične deformacije samih čestica tla (Nonveiller, 1979). Tu konsolidaciju nazivamo sekundarnom.

Vrijeme trajanja procesa konsolidacije, slijeganje pri promjeni stanja naprežanja u tlu, ovisi o intenzitetu i raspodjeli pornog predtlaka, o dimenzijama polja u kojima su nastale promjene pornog tlaka, putu i uvjetima dreniranja, te o propusnosti tla (Szavits-Nossan, 2010). Vrijeme potrebno da se voda istisne iz pora je relativno kratko i praktički zanemarivo kod krupnozrnatih materijala kao što su šljunak i pijesak, pa u tom slučaju ne uočavamo kašnjenje između nanesenog opterećenja i odgovarajućeg priraštaja deformacija. S druge strane, gline su materijali male vodopropusnosti i potrebno je duže vrijeme da bi se voda istisnula iz pora, uz prestanak značajnije promjene volumena.

2.3. Terzaghijeva teorija jednodimenzionalne konsolidacije

2.3.1. Osnovne pretpostavke

Matematička teorija trodimenzionalnog problema je složena čak i uz pretpostavku elastičnog skeleta. Potrebno je zadovoljiti jednadžbe kontinuiteta vode, ali i jednadžbe kompatibilnosti teorije elastičnosti. Zadatak se svodi na rješavanje složenih sistema diferencijalnih jednadžbi koje trebaju zadovoljiti rubne uvjete. Točnih analitičkih rješenja, korisnih u samoj praksi, nema mnogo, tako da se, ukoliko za to postoji potreba, primjenjuju aproksimativne numeričke metode, najviše metode konačnih razlika i konačnih elemenata (Roje-Bonacci, 2003).

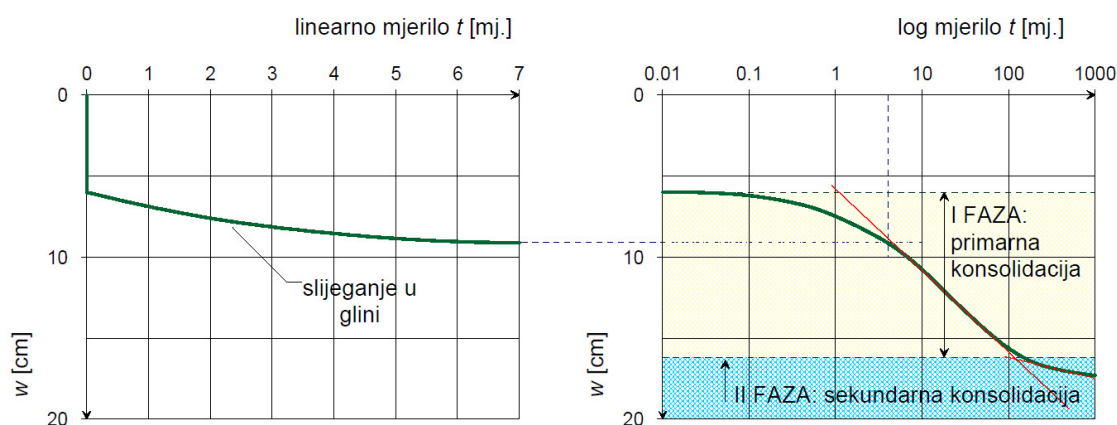
Zbog toga ćemo razmotriti jedno relativno jednostavno klasično rješenje koje je dao Terzaghi. U tlu se često dogodi da se slabo propusni sloj nalazi između dva propusnija sloja. Ako se na takvom tlu gradi građevina, nanosi se dodatno opterećenje koje će izazvati porast poreznog tlaka i proces konsolidacije u slabo propusnom sloju. Uz takve uvjete se može pretpostaviti da je tečenje vode iz slabo propusnog sloja prema rubovima, slojevima veće propusnosti (Roje-Bonacci, 2003). Prevladavajući je tok prema gore i prema dolje u smjeru osi z . Tada govorimo o jednodimenzionalnoj konsolidaciji što bitno pojednostavljuje rješenje problema.

Pretpostavke Terzaghijeve teorije konsolidacije (Budhu, 2010):

- tlo je homogeno,
- tlo je potpuno saturirano,
- voda i čestice tla nisu stišljive,
- deformacije i strujanje vode su jednodimenzionalni (samo u vertikalnom smjeru),

- deformacije su male,
- vrijedi Darcyjev zakon,
- koeficijent propusnosti i modul promjene volumena ostaju konstantnima tijekom konsolidacije,
- postoji jedinstven odnos između koeficijenta pora i efektivnog naprezanja.

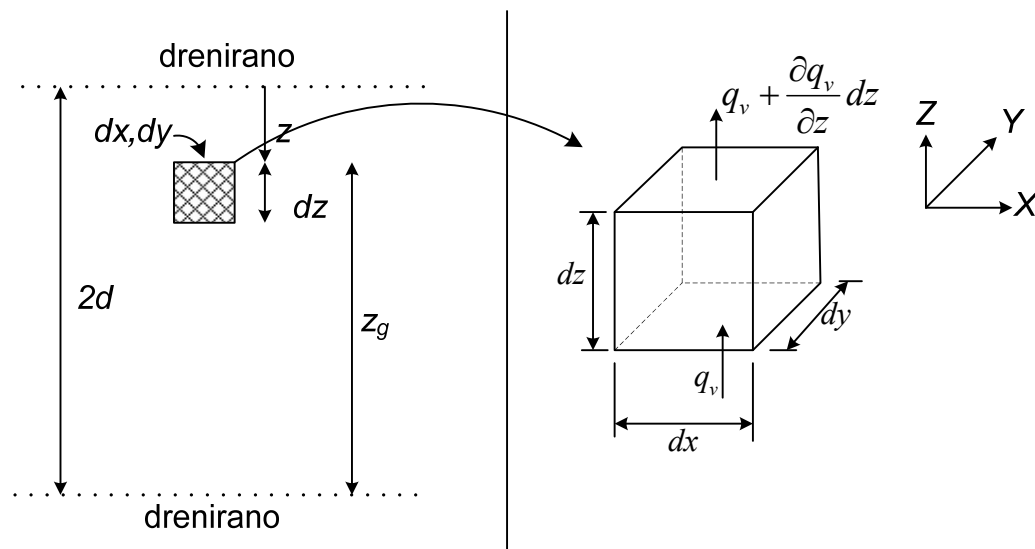
Posebno treba naglasiti da se Terzaghijevom teorijom može obuhvatiti samo primarna konsolidacija, jer prema njoj slijeganje asimptotski teži nuli nakon što disipira sav višak tlaka vode (slika 2).



Slika 2. Dijagrami procesa konsolidacije (Kvasnička; Domitrović, 2007)

2.3.2. Rješenje jednodimenzionalne konsolidacije

Za izvod Terzaghijeve teorije promatrat ćemo element tla malih dimenzija dx , dy , dz na dubini z u sloju tla $2d$ (slika 3). Sa d označavamo najdulji put, koji voda mora proći da bi istekla iz tla. Ako su obje horizontalne granice tla propusne (drenirajuće), onda je d jednak polovini debljine sloja tla, a ako je donja granica nepropusna, onda je d jednak debljini sloja.

Slika 3. Element tla u sloju debljine $2d$

Uzet ćemo u obzir sljedeće pretpostavke (Budhu, 2010):

1. Promjena volumena tla (ΔV) je jednaka promjeni volumena porne vode (ΔV_w), što je jednako promjeni volumena pora (ΔV_p). Promjena volumena je proporcionalna sa promjenom visine.
2. Na bilo kojoj dubini, promjena vertikalnih efektivnih naprezanja je jednaka promjeni pornog predtlaka ($\partial \sigma'_z = \partial u$)

Za naš element tla na slici 3 ulazni protok vode je $q_v dA$, a izlazni protok iz elementa debljine dz je $q_v + (\partial q_v / \partial z) dz dA$. Promjena protoka je $(\partial q_v / \partial z) dz dA$. Stupanj promjene volumena vode koji je jednak stupnju promjene volumena tla, mora biti jednak promjeni protoka (1):

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial q_v}{\partial z} dz dA \quad (1)$$

Promjena volumena izražena preko volumenske deformacije piše se $\varepsilon_p = \partial V / V = \partial e / (1 + e_0)$ i $\partial V = \partial e / (1 + e_0) dz dA = m_v \partial \sigma'_z dz dA = m_v \partial u dz dA$, pa se uvrštavanjem i pojednostavljenjem ovih izraza u (1), dobiva:

$$\frac{\partial q_v}{\partial z} = \frac{\partial u_e}{\partial t} m_v \quad (2)$$

Primjenjujemo Darcyjev zakon za jednodimenzionalno tečenje vode koji glasi:

$$q_v = A k_z i = A k_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3)$$

gdje je k_z koeficijent propusnosti tla u vertikalnom smjeru. Parcijalna diferencijalna jednačba sada glasi:

$$\frac{\partial q_v}{\partial z} = k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad (4)$$

Porni tlak u bilo koje vrijeme je $u = h \gamma_w$, gdje je h visina stupca vode. Parcijalna derivacija pornog tlaka po dubini z sada glasi:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (5)$$

Uvrštenjem (5) u (4) dobivamo:

$$\frac{\partial q_v}{\partial z} = \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (6)$$

Izjednačavanjem (2) i (6) dobiva se:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = \frac{k_z}{m_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (7)$$

zamjenjujemo $k_z / (m_v \gamma_w)$ sa koeficijentom c_v koji nazivamo **koeficijent konsolidacije** čija je mjerna jedinica $[m^2 / s]$. Prepisujemo jednačbu (7) sa

koeficijentom c_v i dobivamo jednadžbu za jednodimenzionalnu konsolidaciju koja glasi:

$$\frac{\partial u_e}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \quad (8)$$

Ova jednadžba opisuje promjene pornog tlaka (Δu) sa vremenom (t) i dubinom (z) (Budhu, 2010).

2.3.3. Rješenje jednadžbe jednodimenzionalne konsolidacije

Jednadžba (8) je linearna parcijalna diferencijalna jednadžba s nepoznatom funkcijom viška tlaka vode $u_e(z, t)$. Ta jednadžba ima samo jedno rješenje za zadane početne uvjete $u_e(z, t=0) = u_i(z)$ za $0 \leq z \leq 2d$ i rubne uvjete na gornjem i donjem rubu glinenog sloja. Kako su obje horizontalne granice propusne (drenirane), na njima je ukupan tlak vode nula, pa je i višak tlaka vode nula, tako da rubni uvjeti glase:

$$u_e(0, t) = 0 \quad i \quad u_e(2d, t) = 0$$

Rješenje Terzaghijeve jednadžbe je u obliku beskonačnog reda:

$$u_e(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{d} \int_0^{2d} u_i(z) \sin \frac{n\pi z}{2d} dz \right) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) \times \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)$$

Ako je $u_i(z)$ konstantan po dubini ($u_i = \Delta \sigma$) onda se rješenje pojednostavljuje:

$$u_e(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2u_i}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) \times \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)$$

Kako je za parne brojeve n , $(1 - \cos n\pi) = 0$, a za neparne je n , $(1 - \cos n\pi) = 2$ uvodimo supstitucije:

$$n = 2m + 1 \quad i \quad M = \frac{\pi}{2}(2m + 1)$$

i bezdimenzionalni vremenski faktor T_v :

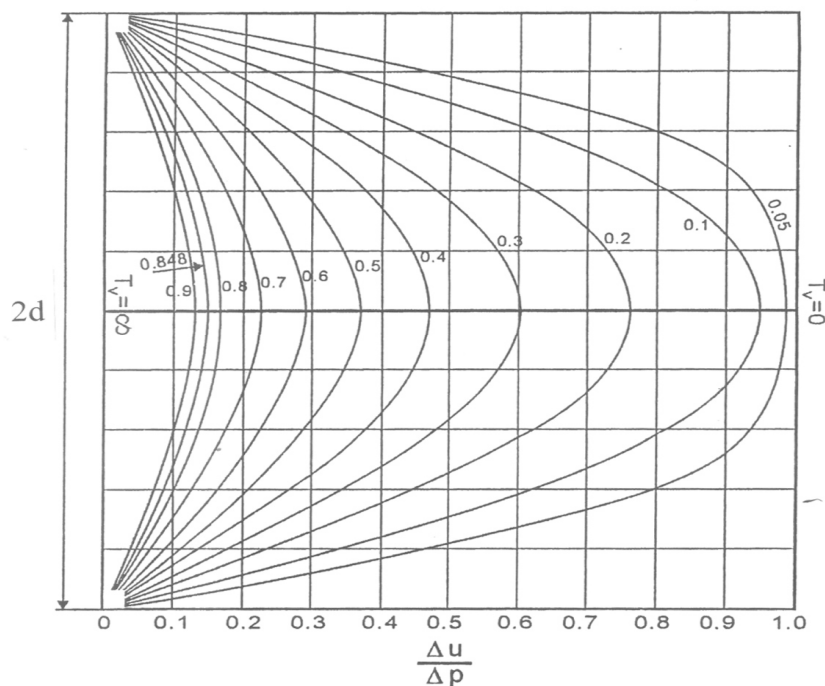
$$T_v = \frac{c_v t}{d^2} \quad (9)$$

pa se rješenje Terzaghijeve jednadžbe svodi na:

$$u_e(z, t) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_i}{M} \left(\sin \frac{Mz}{d} \right) e^{(-M^2 T_v)} \quad (10)$$

Prikazano rješenje Terzaghijeve jednadžbe daje izokrone. Izokrona je krivulja koja, za dano vrijeme t , prikazuje raspodjelu viška tlaka vode $u_e(z, t)$ (ili ukupnog tlaka vode) po visini sloja tla (ili uzorka tla). Kada se $u_e(z, t)$ podijeli s konstantnim početnim viškom tlaka vode u_i , a koordinata z se podijeli s početnom visinom H_0 , dobije se izokrona.

Na slici 4 prikazane su izokrone za dane vrijednosti bezdimenzionalnog vremenskog faktora T_v . Ove su normalizirane izokrone općenitog karaktera u tom smislu da vrijede za sve koeficijente konsolidacije c_v i za sve visine H_0 . Ako su obje granice promatranog sloja tla drenirane, cijele su izokrone relevantne za odgovarajuću raspodjelu tlaka vode, a ako je donja granica sloja nepropusna, samo je gornja polovina izokrone relevantna za raspodjelu tlaka vode. Ovisno o vrijednosti konkretnog koeficijenta konsolidacije i konkretnog najvećeg puta dreniranja d za dani sloj tla, za fiksirani T_v sa slike će se dobiti odgovarajuće vrijeme kada raspodjela tlaka vode, prema Terzaghiju, odgovara upravo izokroni sa slike 4.

Slika 4. Izokrone za dani T_v , (Szavits-Nossan, 2010).

2.3.4. Stupanj konsolidacije

Sada ćemo definirati stupanj konsolidacije U_z na dubini z za dano vrijeme t , u općenitom obliku:

$$U_z(z, t) = \frac{u_i(z) - u_e(z, t)}{u_i(z)} = 1 - \frac{u_e(z, t)}{u_i(z)} \quad (11)$$

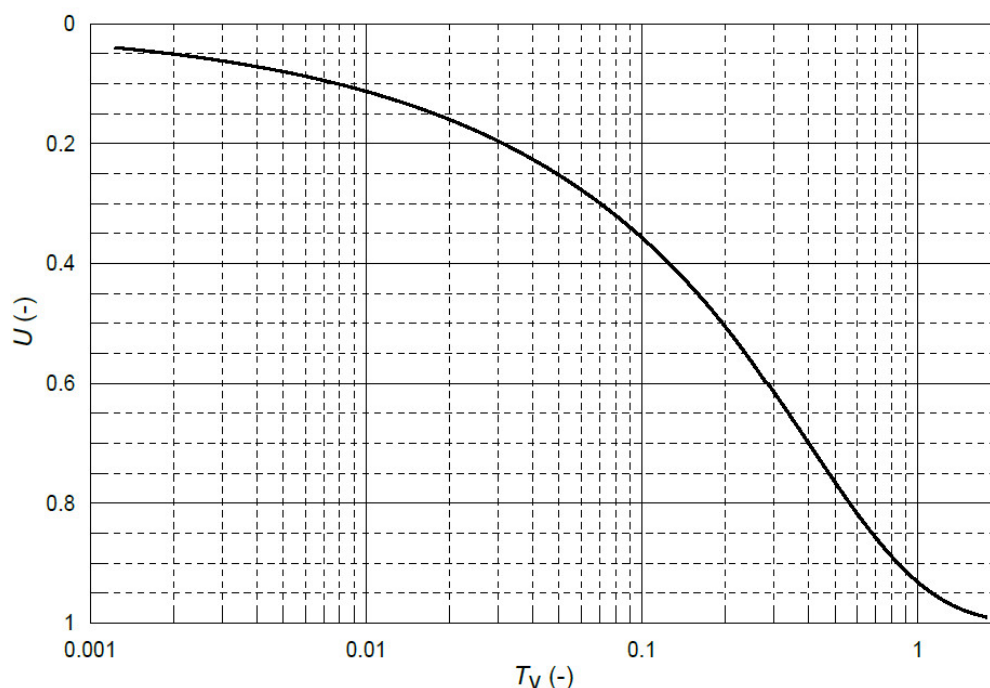
Za konstantni u_i po dubini sloja tla, iz Terzaghijevog se rješenja dobije da je

$$U_z(z, t) = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \left(\sin \frac{Mz}{d} \right) e^{(-M^2 T_v)} \quad (12)$$

Nas zanima prosječni stupanj konsolidacije $U(t)$ za cijeli sloj tla, odnosno postotak od ukupnog slijezanja za dano vrijeme t , koji se dobije integracijom izraza za $U_z(z, t)$ po visini sloja. Dakle,

$$U_z(z, t) = 1 - \frac{(1/H_0) \int_0^{H_0} u_e(z, t) dz}{u_i} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (13)$$

Prosječni stupanj konsolidacije, kojeg ćemo u daljnjem tekstu nazivati samo stupnjem konsolidacije, daje postotak disipacije viška tlaka vode u odnosu na početni višak tlaka vode u_i , za dano vrijeme t . Desna strana gornjeg izraza sadrži samo bezdimenzionalne veličine, tako da je moguće dobiti odnos između stupnja konsolidacije U i bezdimenzionalnog vremenskog faktora T_v (slika 5), koji vrijedi za sve koeficijente konsolidacije i sve visine sloja tla (Szavits Nossan, 2010).



Slika 5. Krivulja vremenskog toka slijeganja; krivulja ovisnosti stupnja konsolidacije U o bezdimenzionalnom vremenskom faktoru T_v , (Szavits-Nossan, 2010).

Budući da krivulja sa slike 5 ima takav oblik da joj se početni dio do $U = 60\%$ može aproksimirati parabolom, a dio između $U = 60\%$ i $U = 90\%$ pravcem u polulogaritamskom mjerilu, mogu se postaviti sljedeći empirijski izrazi za veze između stupnja konsolidacije i bezdimenzionalnog vremenskog faktora:

$$\begin{aligned}
 \text{za } U < 0,6 \quad T_v &= \frac{\pi}{4} U^2 \\
 \text{za } U = 0,6 \quad T_v &= 0,286 \\
 \text{za } U > 0,6 \quad T_v &= -0,933 \log(1-U) - 0,085
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Smisao ove veličine je da se u nekom vremenu $t \neq t_0$, nakon nanošenja opterećenja, može odrediti postotak od ukupnog slijeganja koji će se u promatranom vremenu ostvariti.

Već smo spomenuli da vrijeme konsolidacije raste s kvadratom debljine sloja. Ako želimo taj proces konsolidacije ubrzati, moramo smanjiti debljinu sloja, odnosno skratiti put vodi. Najčešće je to jedino moguće ugradnjom uspravnih drenova, koji uspravnu konsolidaciju pretvaraju u radijalnu, sa znatno kraćim putem vode.

2.4. Radijalna konsolidacija

Ako se u triaksijalnom uređaju pri pokusu konsolidacije dopušta dreniranje samo u vodoravnom smjeru prema gumenoj membrani tada su i deformacije i dreniranje različiti od onih u edometru, nastaje prostorna deformacija i prostorno dreniranje. Pri tome ne možemo primijeniti Terzaghijevu teoriju o jednodimenzionalnoj konsolidaciji, nego *Biotovo* prostorno rješenje (Nonveiller, 1979).

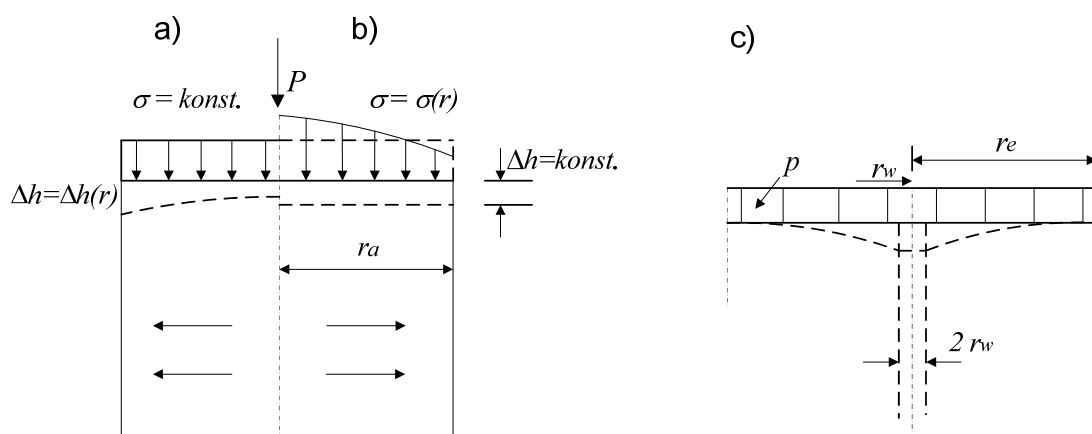
U praksi se sličan problem pojavljuje kada se pomoću uspravnih drenova želi ubrzati konsolidacija stišljiva sloja. Pretpostavka je da se tlo u radijusu r_0 oko osi drena drenira prema njemu. Jednadžba kontinuiteta može se za radijalne koordinate pisati u jednodimenzionalnom obliku:

$$k_r \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (15)$$

koja uz $h = \frac{u}{\gamma_w}$ postaje:

$$k_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (16)$$

Upotrijebe li se uspravni drenovi da bi se ubrzala konsolidacija, nastat će u toku konsolidacijskog procesa najveće slijeganje oko drenova, a najmanje će biti na najvećoj udaljenosti među njima. Na kraju konsolidacije deformacija će opet biti jednaka na svim točkama radijusa. Polje deformacija ovisit će o načinu opterećenja. Ako područje izvrgavamo sasvim fleksibilom opterećenju površine (slika 6b), ono ne ovisi o deformaciji površine (npr. upotreba vakuuma u drenovima). Kad se teret prenosi preko krute plohe, prvobitno se kontinuirano opterećenje površine tokom vremena pojačava na većoj udaljenosti od drenova, a smanjuje se oko svakog drena (slika 6c) (Nonveiller, 1979).



Slika 6. Ovisnost radijalne konsolidacije oko drena za različite načine opterećivanja površine: a) kontinuirano opterećenje, b) fleksibilno opterećenje, c) opterećenje preko krute plohe (iz Nonveiller, 1979).

Uz pretpostavku da je tlo potpuno zasićeno i da je opterećenje u vremenu konstantno, dobivamo za brzinu promjene volumena (desna strana jednadžbe (16) postaje):

$$m_v \gamma_w \frac{\partial u}{\partial t} \quad (17)$$

pa s koeficijentom konsolidacije za radijalno dreniranje:

$$c_r = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (18)$$

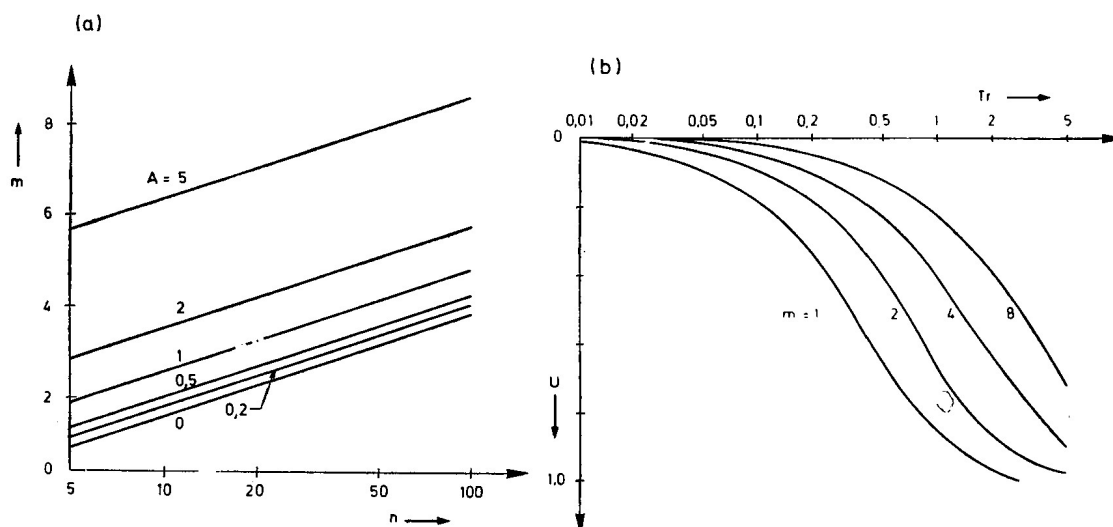
diferencijalna jednadžba radijalne konsolidacije postaje:

$$c_r \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (19)$$

Barron (1948) je dao rješenje te jednadžbe za slobodnu deformaciju pri konstantnom opterećenju površine tla, uz pretpostavku da je koeficijent stišljivosti drena $a_v = 0$, a koeficijent propusnosti neizmjeran. Uzeo je u obzir da se bušenjem drena stjenka bušotine razmazuje i tako u sloju velike debljine postaje manje propusna nego što je prirodno tlo (Nonveiller, 1979). Slika 6.b predstavlja rješenje jednadžbe za radijalno dreniranje (19). Prosječni predtlak porne vode u konsolidacijskom procesu je:

$$u = e^{\frac{-2T_r}{m}} \quad (20)$$

gdje je $T_r = c_r t / r_e^2$, m je parametar dan za razne odnose n između razmaka (r_e) i promjera (r_w) drenova i parametra otežanog procjeđivanja A .



Slika 7. Prosječni stupanj konsolidacije s vertikalnim drenovima: a) parametri m i n , b) prosječni stupanj radijalne konsolidacije (Nonveiller, 1979)

U slučajevima gdje osim vertikalnih tokova imamo i horizontalne, odnosno radijalne, u tlu se javlja prostorni tok vode. *Newman (1931)* je prikazao da se rješenja za prostorni tok dobivaju superponiranjem parcijalnih rješenja jednodimenzionalne konsolidacije. Pretpostavlja se najprije samo radijalno dreniranje s rješenjem diferencijalne jednačbe (19) i posebno samo vertikalno dreniranje s rješenjem diferencijalne jednačbe (8) (Nonveiller, 1979). Rješenje za kombinirano vertikalno i radijalno drenirano bit će:

$$u_{r,v,t} = u_{r,t} \cdot u_{v,t} \quad (21)$$

a prosječni stupanj konsolidacije za prostorno dreniranje je:

$$U_{r,z} = 1 - (1 - U_r) \cdot (1 - U_v) \quad (22)$$

3. Određivanje vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla

Koeficijent vodopropusnosti je složena konstanta tla ovisna o geometriji i širini pora između čvrstih čestica kroz koje voda teče, dakle o osobinama tla s jedne strane i o viskozitetu tekućine koja teče s druge strane (Nonveiller, 1979). Koeficijent propusnosti tla određuje se ispitivanjima u laboratoriju na uzorcima tla, na terenu (in – situ) ili indirektno, preko empirijskih korelacija. Ovdje ćemo promatrati određivanje koeficijenta vodopropusnosti u laboratoriju i na terenu za sitnozrnata odnosno slabopropusna tla.

3.1. Laboratorijske metode određivanja koeficijenta vodopropusnosti sitnozrnatog tla

Određivanje koeficijenta propusnosti sitnozrnatog tla u laboratoriju provodi se metodom s promjenjivom razlikom tlakova odnosno s promjenjivim padom potencijala. U novije vrijeme javila se i metoda zadanog protoka tzv. modificirana metoda konstantne razlike tlakova kod koje se nameće određeni protok fluida kroz uzorak, a mjeri odgovarajuća razlika tlakova.

3.1.1. Metoda s promjenjivim padom potencijala

Mjerenje s promjenjivim padom je ono u kojemu se za vrijeme trajanja pokusa razlika potencijala mijenja (smanjuje) jer voda u cjevčici stalno pada. Na slici 7 prikazan je uređaj za mjerenje propusnosti s promjenjivim padom potencijala. Uređaj se sastoji od metalnog cilindra male visine i većeg promjera (kao u edometru), dviju poroznih pločica između kojih je prethodno pripremljeni uzorak. Kroz donji porozni filter ulazi voda iz vertikalne cijevi a na gornjem izlazi

preko preljeva. Neka je A površina presjeka uzorka (cm^2), l visina uzorka (cm), a presjek vertikalne cijevi (cm^2), h_1 visina vode u cijevi prije pokusa (cm), i h_2 visina vode u cijevi nakon pokusa (cm). Možemo pisati:

$$dq = A \cdot v \cdot dt = A \cdot k \cdot (h/l) \cdot dt = a \cdot dh \quad (23)$$

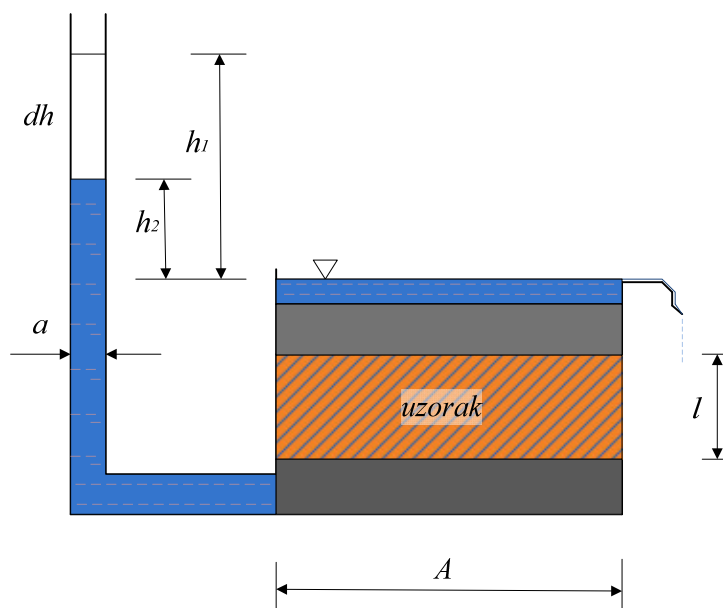
što se može napisati kao diferencijalna jednačba

$$\frac{dh}{h} = k \cdot \frac{A}{a \cdot l} \cdot dt \quad \text{čije je rješenje} \quad (24)$$

$$\ln h = k \cdot t \cdot \frac{A}{a \cdot l} \quad (25)$$

Rubni i početni uvjeti se dobiju tako da se, za interval Δt mjere početna i konačna visina stupaca vode, h_1 i h_2 , pa se koeficijent propusnosti k izračuna iz:

$$k = \frac{a \cdot l}{A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (26)$$



Slika 8. Shema mjerenja koeficijenta propusnosti s promjenjivim padom potencijala (Kvasnička; Domitrović, 2007).

Postupak je slijedeći: uzorak se ugradi u troosnu ćeliju i konsolidira, a njegova zasićenost se osigurava povratnim tlakom. Kroz konsolidirani uzorak nameće se zadani protok - s donje strane uzorka, a na drugom kraju - gornjoj strani, početni poredni tlak održava se stalnim. Kao reakcija na zadani protok, na donjoj strani uzorka dolazi do postupnog porasta porednog tlaka. Kada se tlak ustali, uspostavljeno je stacionarno tečenje kroz uzorak, pa se može pristupiti određivanju hidrauličkog gradijenta, i . Uz poznati protok koeficijent propusnosti određuje se prema Darcyjevom zakonu kao odnos protoka i gradijenta (27):

$$k = \frac{v}{i} = \frac{\frac{V}{At}}{\frac{\frac{\Delta u}{\gamma_w} - \Delta l}{\Delta l}} \quad (27)$$

gdje je k koeficijent propusnosti [cm/s], i hidraulički gradijent [1], v brzina tečenja kroz jediničnu površinu uzorka [cm/s], V volumen vode [cm³], A površina uzorka [cm²], t vrijeme [s], Δu promjena porednog tlaka [N/cm²], Δl put na kojemu se mijenja tlak [cm], γ_w zapreminska težina vode [N/cm³].

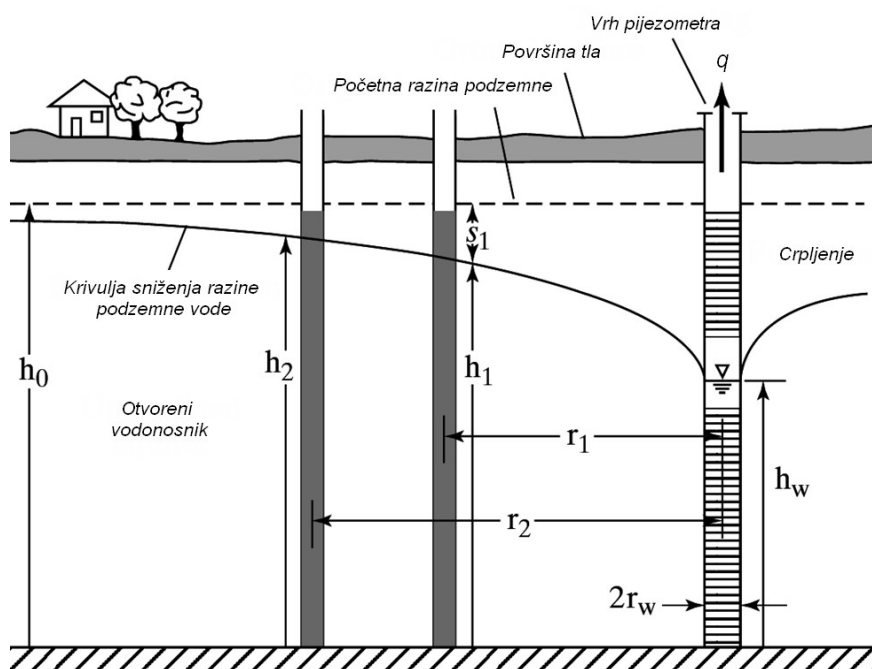
3.2. Terenske metode

Rezultati laboratorijskih mjerenja daju podatak za homogeni uzorak tla vrlo malih dimenzija (Roje-Bonacci, 2007). Ovo se mjerenje često vrši u kombinaciji s mjerenjima stišljivosti uzorka u edometru. Na pouzdanost laboratorijskih rezultata osim toga utječe stupanj zasićenosti uzorka, migracija finih čestica, temperatura vode i okoliša i drugo. Iz tih se razloga za potrebe preciznijeg određivanja prosječnog koeficijenta procjeđivanja na određenoj lokaciji, gdje je to za postojeći problem bitno, vrše ispitivanja "in situ", na terenu. Uglavnom se za sitnozrnata tla provodi metoda crpljenja iz bunara (Roje-Bonacci, 2007).

3.2.1. Crpljenje iz bunara

Osnova crpljenja iz bunara sastoji se u opažanju sniženja (pada) vode u zdenцу, odnosno na jednom ili više kontrolnih pijeometara raznih udaljenosti od zdenca (Nonveiller, 1979). Crpljenjem iz bunara stvara se depresija u njegovu okolnom području. Sniženje vode mjeri se kao razlika stacionarne (statičke) razine vode prije početka crpljenja i promijenjene razine zbog crpljenja, i to u funkciji vremena i udaljenosti od probnog zdenca.

Iz podataka o sniženju razine vode u pijezometrima prilikom probnog crpljenja i na osnovi mjerenja protoka q [cm³/s], može se izračunati koeficijent vodopropusnosti k [m/s] prema jednadžbi (28) o kapacitetu bunara.



Slika 10. Crpljenje iz bunara

$$k = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{h_w \cdot (s_1 - s_2)} \quad (28)$$

4. Općenito o tehnologiji izvedbe šljunčanih pilota

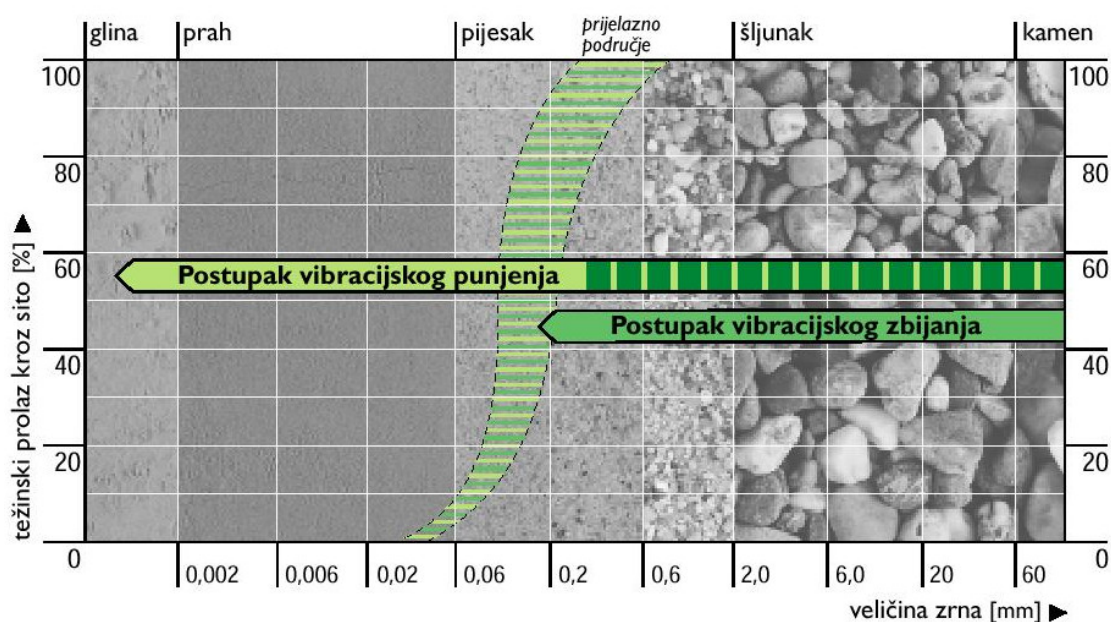
Šljunčani piloti izvode se kao jedna od metoda poboljšanja tla u smislu ubrzanja slijeganja slabopropusnih, sitnozrnatih tala na račun skraćanja puta dreniranja. Jedna od metoda koje se mogu koristiti je i predopterećenje lokacije sa nasutim materijalom kojim se želi ostvariti konsolidacija na račun brzog prirasta efektivnih naprezanja. Ove dvije metode se mogu kombinirati.

4.1. Općenito o postupku dubinskog vibracijskog zbijanja

Postupak dubinskog vibracijskog zbijanja izvođenjem šljunčanih stupova predstavlja metodu poboljšanja temeljnog tla. Ugrađuju se samo prirodni materijali (šljunak ili drobljenac) bez ili sa udjelom cementa.

Izvedba se provodi spuštanjem vibratora do projektom predviđene dubine. Postupak zbijanja se provodi odozdo prema površini terena (Slike 12 i 13). Dubinski vibrator je u obliku cilindra, promjera 30 do 50 cm, dužine 3 do 4 m, ovisno o tipu, te cca 2 tone težak. U donjem dijelu vibratora, odmah iznad šiljka, nalazi se ekscentrična masa s okretnim pogonom od jakog elektromotora (do 150 kW). Na taj način proizvodi se jaki rotacijski udar velike energije. Dubinski vibrator produžuje se pomoću natačnih cijevi do proizvoljne duljine, a vođenje osigurava posebni uređaj.

Razlikuju se dvije metode dubinskog vibracijskog zbijanja, ovisno o vrsti tla. U nevezanom tlu primjenjuje se postupak vibracijskog zbijanja, a u vezanom i mješovitom tlu postupak vibracijskog punjenja. Granice primjene prikazane su na slici br. 11.

Granice primjene PDVZ

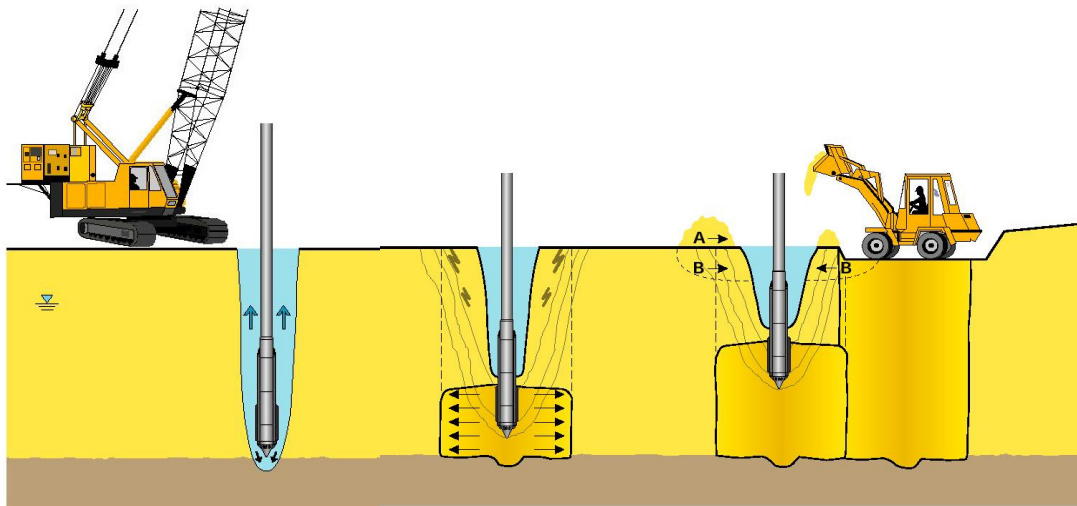
Slika 11. Granice primjene postupka dubinskog vibracijskog zbijanja

4.2. Postupak dubinskog vibracijskog zbijanja u nevezanom tlu

Prirodna ili nasuta nevezana tla sa gustoćom manjom od maksimalne, dubinskim oscilacijama i vibracijama mogu se zbiti u gušće pakiranje. Poboľšano tlo ima nove, bolje geomehaničke karakteristike. Povećana je gustoća tla (zbijenost), a time i kut unutarnjeg trenja (φ) te modul stišljivosti (M_v).

Variranjem rastera napadnih točaka, tlo heterogenih karakteristika pretvara se u tlo jednolike nosivosti po cijeloj obrađenoj površini.

Postupak izvođenja prikazan je na slici br. 12.



Slika 12. Postupak izvođenja šljunčanih drenova vibriranjem

Glava uređaja vibrira i potpomognuta tlakom vode, koja ispire i sitne čestice, prodire u tlo do projektirane dubine. Kad je dubina dosegnuta, protok vode se smanji i započinje proces zbijanja.

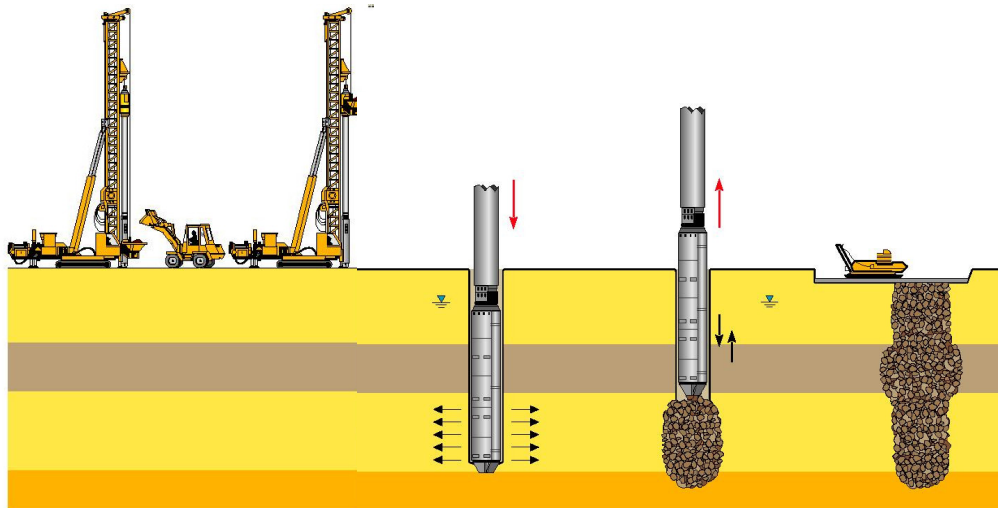
Izvodi se u stupnjevima odozdo prema gore, a obuhvaća valjak tla oko vibratora promjera i do 5 m. Efekt zbijanja registrira se potrošnjom struje elektromotora vibratora. Na površini terena, oko vibratora, formira se lijevak koji se puni dovezenim materijalom. Potrebna količina materijala za ispunjavanje lijevka može iznositi i do 10% od obrađenog volumena tla, ovisno o prirodnoj zbijenosti tla. Nakon završetka dubinskog vibracijskog zbijanja, skida se površinski sloj, te se temeljno tlo površinski zbije valjanjem.

Mješovita tla sa udjelom sitne frakcije ($d < 0,06$ mm) većim od 20% obično se ne mogu dubinskim vibracijama efektivno zbijati, pa se u takva tla ugrađuje kostur od nosivog nekoherentnog materijala, koji se sa strane oslanja na postojeće okolno tlo. Ovdje se radi o postupku dubinskog vibracijskog zbijanja s punjenjem odnosno izvođenjem šljunčanih stupova u vezanom tlu.

4.3. Postupak dubinskog vibracijskog zbijanja u vezanom i mješovitom tlu

Vezana tla, osobito kada su zasićena vodom, ne mogu se samim dubinskim vibriranjem efektivno zbijati. U takva tla se ugrađuju stupovi od šljunka ili kamena drobljenca koji onda preuzimaju dodatna opterećenja. Zajedno s okolnim tlom ovakav zrnast materijal ugrađen pomoću vibratora ima veću krutost i pruža veći otpor smicanju. Povećana je nosivost temeljnog tla, a smanjena slijeganja (ukupna i diferencijalna). Zbog velike vodopropusnosti šljunčanih stupova znatno je ubrzano vrijeme konsolidacije, a time i brže sukcesivno povećanje posmične čvrstoće prirodnog tla.

Princip izvođenja postupka sličan je prethodno opisanom, a prikazan je na slici br.13.



Slika 13. Postupak zbijanja u vezanim tlima

Vibrator s uređajem za doziranje i prisilnim vođenjem postavlja se iznad obilježene točke. Hidrauličkim putem fiksira se na oslonce – noge. Posebni utovarivač puni posudu postrojenja materijalom. Posuda s materijalom diže se

uz konstrukciju stupa i prazni svoj sadržaj u uređaj za doziranje. Nakon zatvaranja uređaja posebnom zaklopkom komprimirani zrak potiskuje materijal prema izlaznom otvoru na šiljku vibratora.

Vibrator istiskuje okolno tlo i spušta se do projektirane dubine, potpomognut tlakom vode ili zraka i prema dolje usmjerenoj vertikalnoj sili sa stupne konstrukcije. Kad je konačna dubina dosegnuta, vibrator se podiže za 30 do 50 cm, stvara šupljinu ispod sebe, u koju ulazi materijal pod pritiskom. Ponovnim spuštanjem vibratora materijal se zbija i bočno utiskuje u okolno tlo. Na taj način se sukcesivno od dolje prema gore izvodi šljunčani stup, do površine terena ili do predviđene visine.

Dimenzioniranje šljunčanih stupova vrši se na osnovu podataka o temeljnom tlu, oblika i vrste temelja i željenog stupnja poboljšanja tla.

Radovi, te učinak zbijanja kontinuirano se kompjuterski prate tokom cijele gradnje. Sva mjerenja su elektronska i potpuna automatizirana tako da ne zahtijevaju stalni nadzor osoblja. Podaci se odmah ispisuju na terenski printer, a pristup podacima je višestruko zaštićen, tako da se na njima ne može utjecati izvana, što odgovara najvišim standardima o osiguranju kvalitete i kontrole izvršenih radova.

4.4. Kontrola postupka dubinskog vibracijskog zbijanja

GEODETSKA KONTROLA

Tijekom građenja potrebno je provoditi radnje:

- stalna kontrola iskolčenja građevine – položajno i visinski
- stalna kontrola osiguranja svih točaka
- stalna kontrola obračuna količine radova

ČIŠĆENJE TERENA I SKIDANJE HUMUSA

Kontrolu kvalitete obavljati u svemu prema važećem standardu U.E1.010. Radove izvoditi uz primjenu higijensko-tehničkih zaštitinih mjera, bez nanošenja štete onim objektima koji su već izgrađeni.

TEHNIČKA OPREMA I PRIPREMA GRADILIŠTA ZA RAD

U cilju ostvarenja cjelovitog i dosljednog izvršenja građevinskih radova provoditi kontrolu organizacije gradilišta, tehničke opreme i korištene mehanizacije u skladu sa zahtjevima projekta.

KONTROLA KAMENE FRAKCIJE

Kamena frakcija je 8/32 ili 16/32, s maksimalnim zrnom $d = 32$ mm od separiranog šljunka ili drobljenca iz kamenoloma. Kontrola se provodi vizualno. Izvođač treba priložiti atestnu dokumentaciju za ugrađenu kamenu frakciju.

PRIJEVOZ MATERIJALA

- koristiti vozila većih kapaciteta
- koristiti višenamjenska vozila, koja mogu obavljati više međusobno različitih radnji

DEPONIRANE MATERIJALA

Pozornost posvetiti pravilnoj odvodnji oko deponije i na deponiji, te ocjeni geomehaničkih karakteristika.

4.4.1. Kontrola kvalitete izvedbe šljunčanih pilota

Radovi na svim vrstama dubinskog vibriranja, te učinak zbijanja, kontinuirano se prate tokom cijele gradnje preko računala. Sva mjerenja su

elektronska i potpuna automatizirana, tako da ne zahtijevaju stalni nadzor osoblja. Podaci se odmah ispisuju na terenski pisač, a pristup podacima je višestruko zaštićen. Na dobivene podatke se ne može utjecati izvana. Na taj način osigurava se poštovanje najviših standarda vezanih za osiguranje kvalitete i kontrolu izvršenih radova.

Mjerni uređaj sastoji se od: upravljačke jedinice u kabini postrojenja, centralne jedinice za pohranu podataka, pisača i računala.

U procesu zbijanja automatski se registriraju slijedeće informacije:

- broj gradilišta,
- broj šljunčanog stupa,
- datum,
- vrijeme izvođenja, početak i kraj svakog stupa,
- dubinu zbijanja, odnosno dužinu svakog šljunčanog stupa,
- električna energija zbijanja (vibriranja).

Sa kompjuterskog ispisa može se odrediti broj pražnjenja košare sa materijalom, a time i ukupno ugrađenu količinu kamena za svaki stup. Na kraju svake smjene sumarno se daje prikaz svih izvedenih stupova sa pojedinačnim i ukupnim dužinama, vremenom trajanja i energetske parametrima.

Nakon završetka radova, kontrola postignutog poboljšanja provodi se provedbom:

- dinamičkog penetracijskog testa teškom udarnom sondom prema DIN-u: 8 ispitivanja, od čega 3 kroz šljunčani pilot, a 3 pokraj pilota,
- ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti (E_{dyn}) šljunčanog pilota na dubini temeljenja prema DIN-u: 8 ispitivanja,
- spektralne analize površinskih valova (SASW) u 5 profila

Kontrola postignute kvalitete stupnjaka provodi se ispitivanjem tlačne čvrstoće cementne suspenzije. Na svakom pilotu se uzima po jedan uzorak koji se ispituje na tlačnu čvrstoću, koja mora biti minimalno 5 MN/m^2 .

Kontrola postignute čvrstoće gotovih stupnjaka provodi se na dva stupnjaka (po odabiru nadzornog inženjera). Provodi se bušenje pilota i uzimanje uzoraka iz njihova tijela na različitim visinama. Uzorci se ispituju na tlačnu čvrstoću u ovlaštenom laboratoriju. Zahtjevana čvrstoća je minimalno 5 MN/m^2 .

4.5. Tehnička promatranja

MJERENJE VERTIKALNIH POMAKA

Geodetske točke

Pomoću ugrađenih geodetskih kontrolnih točaka, određuje se stanje apsolutnih vertikalnih i horizontalnih komponenata pomaka točaka na nasipu. Geodetska mjerenja se provode geodetskim metodama opažanja i instrumentima posebne namjene i odgovarajuće preciznosti mjerenja.

a) Mjerenje horizontalnih pomaka kontrolnih točaka

Mjerenje horizontalnih pomaka kontrolnih točaka vršit će se metodom presijecanja stalnih točaka mikrotriangulacijske mreže. Zahtjevana točnost mjerenja horizontalnih pomaka iznosi ± 1.0 do $\pm 10.0 \text{ mm}$.

b) Mjerenje vertikalnih pomaka kontrolnih točaka

Za određivanje vertikalnih komponenata pomaka kontrolnih točaka predviđa se korištenje geometrijskog nivelmana. Zahtjevana točnost ovih mjerenja iznosi $\pm 1,0 \text{ mm}$.

Klizni deformetar

Mjerenja linijskih deformacija i pomaka tla po dubini kliznim deformetrom zasniva se na mjerenju relativnih deformacija u tlo ugrađenih specijalnih PVC cijevi promjera ϕ 51/63 mm. Cijevi su duljine 1.0 m i spajaju se specijalnim teleskopskim spojnicama profila ϕ 67 mm. Spojnice se teleskopski deformiraju i tako omogućavaju mjerenje relativnih deformacija. Cijevi se injektiranjem ugrađuju u izvedene bušotine promjera ϕ 100 mm. Raspon mjerenja je ± 22.5 mm/m s preciznošću u terenskim uvjetima ± 0.003 mm/m.

Prvo mjerenje ujedno je i referentno mjerenje. Deformacijom tla mijenjaju se međusobni razmaci spojnica. Ponovno mjerenje razmaka spojnica rezultira relativnim deformacijama mjerne cijevi na metar dužine. Integriranjem relativnih deformacija izračunavaju se pomaci tla.

PIEZOMETARSKA OPAŽANJA

Piezometar

Zadatak je pratiti nivo podzemne vode, odnosno porni pritisak u zoni u kojoj se provodi mjerenje. Tlocrtni položaj, dubina, materijal, način izvedbe, te mjesta perforacija piezometra bit će definirani u izvedbenom projektu.

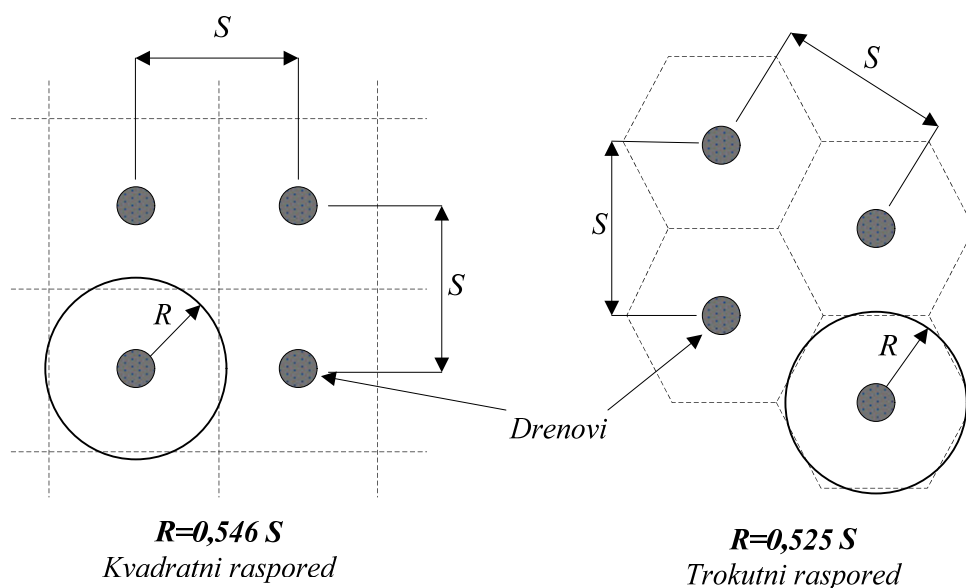
OBAVEZE IZVOĐAČA

- Tehnološki program izvedbe sa popisom opreme
- Plan rada i dinamički plan izvedbe
- Provedba tehničkih promatranja prema programu, koji će biti definiran u izvedbenom projektu (može preuzeti investitor)

4.6. Projektiranje šljunčanih pilota

Šljunčani piloti (drenovi) se izvode strojnim bušenjem kroz tlo koje završava blizu ili na nepropusnoj granici. U bušotinu se zatim ubacuje količina šljunka u slojevima koji se zbija. Šljunčani dren čiji je kraj na nepropusnoj granici naziva se polu zatvoreni dren. Takav dren stvara radijalno konsolidiranje tla te smanjuje vrijeme za dani stupanj konsolidacije za četiri puta (Budhu, 2010).

Promjer šljunčanih drenova je obično od 200 do 600 mm. Za promjer je važno da bude dovoljno velik da drenira poru vodu i spriječi prerano začepljenje pora. Začepljenje pora drena se može spriječiti raznim filterima. Razmak između drenova ovisi o propusnosti tla i željenom vremenu da se postigne zahtijevani stupanj konsolidacije. Razmak drenova mora biti manji od debljine slabo propusnog sloja tla. Razmaci su obično od 2 do 5 m te mogu biti u kvadratnom ili trokutnom rasporedu (slika 14). Radijus utjecaja drena R je oko $0,55 S$ za kvadratni raspored i oko $0,53 S$ za trokutni raspored, S je razmak drenova.



Slika 14. Raspored drenova i utjecajni faktor rasporeda R

Propusnost tla u horizontalnom ili radijalnom smjeru je nekada puno veća (2 do 10 puta) nego u vertikalnom smjeru što ima za posljedicu da je koeficijent konsolidacije c_h veći nego c_v ($c_h / c_v = 1,2 - 2$). Prilikom bušenja se često tanki sloj oko bušotine razmaže pa sprečava dotok vode u dren, što treba uzeti u obzir (Budhu, 2010). Prosječni stupanj konsolidacije se tada računa prema jednadžbi 22.

U centru analize šljunčanih pilota je određivanje potrebnog razmaka drenova s kojim bi se zadovoljilo željeno slijeganje tla. Procedura za nalazak razmaka je slijedeća (Budhu, 2010):

1. Odrediti vrijednosti c_v , c_h , m_v
2. Izračunati slijeganje primarne konsolidacije
3. Odrediti stupanj konsolidacije za željenu količinu primarne konsolidacije U_{RZ}
4. Odrediti vremenski faktor T_v prema jednadžbi (9)
5. Odrediti U iz slike 5 ili iz jednadžbi (14)
6. Zamijeniti U_{RZ} i U u (23) i naći U_R
7. Naći T_r u ovisnosti od n rješavajući $T_r = c_h \cdot t / 4R^2 = c_h \cdot t / 4(n \cdot r_d)^2$, r_d je radijus drena a n je R/r_d
8. Sada treba naći vrijednost T_r takvu da odgovara stupnju konsolidacije iz šestog koraka, to se radi iteracijom vrijednosti. Prvo se očita vrijednost n sa slike 6a i izračuna T_{r1}
9. Izračunati razmak S u ovisnosti o željenom rasporedu. Za kvadratni raspored $S = 1,8R = 1,8nr_d$, a za trokutni je $S = 1,9R = 1,9nr_d$

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

Kao što je već kazano, ako se želi ubrzati proces konsolidacije u slabo propusnim tlima, mora se skratiti put dreniranja vode odnosno smanjiti debljinu sloja. Ubrzanje slijeganja može se tada najčešće postići na dva načina; jedan je nanošenje predopterećenja a drugi je ugradnja vertikalnih drenova u tlo. Ove dvije metode se često izvode zajedno.

U ovom poglavlju ćemo na konkretnim primjerima iz prakse prikazati primjenu šljunčanih pilota i njihovu zadaću pri određenim uvjetima u tlu.

5.1. Projekt Rugvica

U mjestu Rugvica, predviđena je izgradnja servisno poslovnog objekta. Građevina se sastoji od poslovnog dijela, montažne hale i monolitne hale s galerijom. Temeljenje poslovnog dijela predviđeno je na temeljnim trakama širine 60 i 70 cm, a hale na temeljnim stopama tlocrtnih dimenzija 3,0 x 3,0 m.

Prema geotehničkom izvještaju tlo je građeno od nisko plastične pjeskovite gline lako do srednje gnječivog konzistentnog stanja. Razina podzemne vode registrirana je na dubini između 1,0 i 1,5 m od površine terena.

S obzirom da na ovakvom tlu (mekane gline) može doći do prekomjernog slijeganja temelja odlučeno je provesti ojačanje temeljnog tla izvedbom šljunčanih stupova (Prilog 3).

Za potrebe projektiranja i izrade geostatičkih proračuna usvojen je model tla preuzet iz geotehničkog izvještaja:

Tablica 1: Teren na lokaciji

Dubina (m)	Oznaka tla	Opis tla	M_v [MPa]	γ [kN/m ³]
0,0 – 3,5	CI/CL	Pjeskovita glina, srednje gnječive konzistencije	3,0	19
3,5 – 8,0	CI/CL	Pjeskovita glina, niske do srednje gnječive konzistencije	2,5	19

Proračuni slijeganja temeljnog tla prije i nakon poboljšanja izvedeni su programskim paketom „GRETA – Ground Improvement by installed structural foundation elements“, kojim se faktori poboljšanja fizičko-mehaničkih karakteristika tla određuju prema H. Priebe-u.

5.1.1. Redoslijed izvođenja radova

Radovi na poboljšanju temeljnog tla izvode se slijedećim redoslijedom:

1. Skidanje humusa i izravnavanje terena
2. Izvedba radnog planuma od drobljenog kamena ili šljunka debljine 50 cm za nesmetano kretanje stroja na gusjenicama;
3. Iskolčenje građevinskih osi;
4. Iskolčenje šljunčanih stupova (točke poboljšanja);
5. Izvedba dubinskog zbijanja do projektirane dubine;
6. Iskop za temelje sa produbljenjem 30 cm ispod donje kote temelja. U produbljenje se ugrađuje sloj kamenog materijala i uvalja na modul zbijenosti 20 MPa;
7. Betoniranje temelja.

5.1.2. Geostatički proračuni

Geostatički proračuni poboljšanja tla šljunčanim stupovima provedeni su programskim paketom GRETA – Ground Improvement by installed structural foundation elements, verzija 40115, firme GEOSStat, autor H. J. Priebe, a slijeganja tla prije i nakon poboljšanja programom GGU-Footing.

Geotehničke karakteristike tla preuzeta su iz geotehničkog elaborata, a opterećenja na temeljno tlo iz statičkog proračuna. Računsko slijeganje objekta bez provedbe dodatnih mjera na temeljenju iznosi između 6 i 9 cm. Kao mjera ojačanja tla i ubrzanja slijeganja izvest će se šljunčani stupovi.

5.1.3. Temeljne stope

Stope su tlocrtnih dimenzija 3,0 x 3,0 m temeljene na dubini 1,5 m. Kontaktno naprezanje na temeljno tlo iznosi 130 kN/m². Po stupnom mjestu izvest će se 5 šljunčanih stupova do dubine 8 m. Utjecajna dubina iznosi oko 7 m.

Ulazni podaci proračuna:

- računski promjer šljunčanih stupova $D = 0,8$ m;
- broj šljunčanih stupova po stopi $n = 5$;
- prosječna dubina poboljšanja $H = 8$ m;
- kut unutarnjeg trenja drobljenog kamena $\phi_s = 40^\circ$;
- moduli stišljivosti tla $M_v = 3,0$ odnosno $2,5$ MN/m²;

Za te uvjete dobivene su slijedeće vrijednosti:

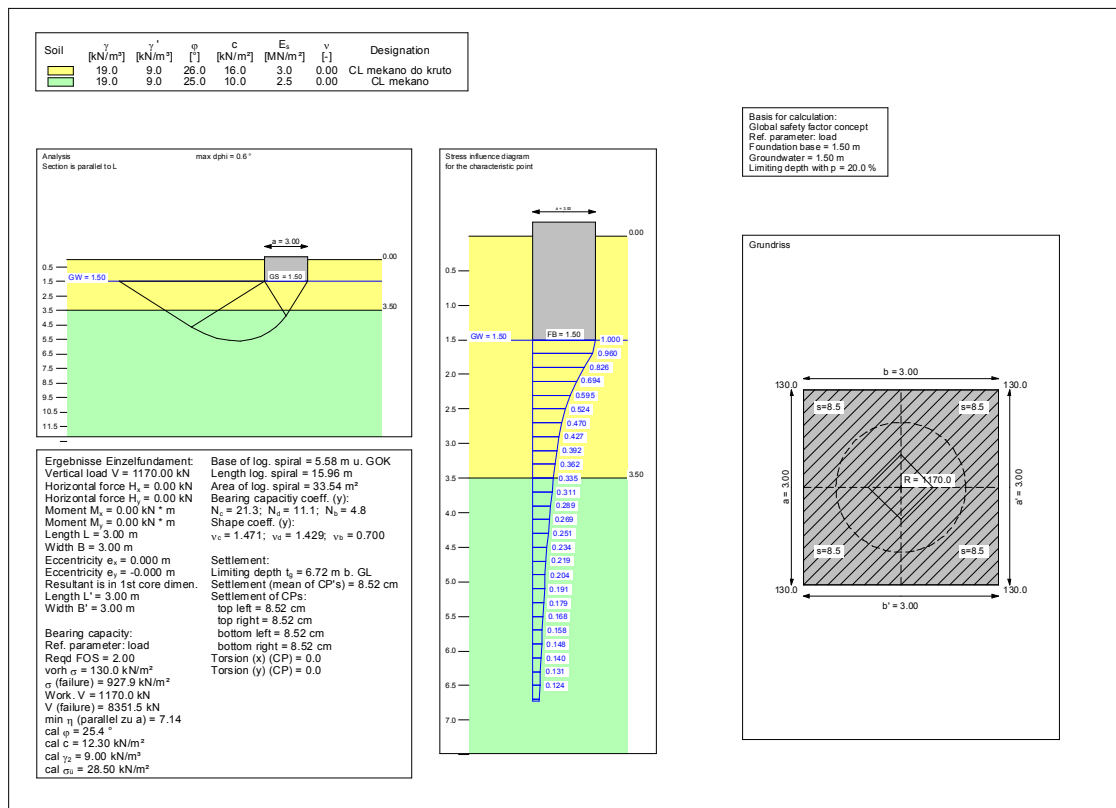
- površina koju pokriva jedan šljunčani stup $A = 1,8$ m²;

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

- osnovni faktor poboljšanja prema Priebe-u $n_0 = 2,0$;
- dio opterećenja koje preuzima šljunčani stup $m' = 0,5$;
- moduli stižljivosti zamjenskog materijala $M_v = 8,0 \text{ MN/m}^2$;
- slijeganje temeljnog tla nakon poboljšanja $s = 2,5 \text{ do } 3 \text{ cm}$;

Numerički i grafički ispis geostatičkih proračuna dat je u nastavku.

a) slijeganje temeljne stope bez poboljšanja



b) određivanje stupnja poboljšanja prema Priebe-u

SERVISNO POSLOVNI OBJEKT RUGVICA

Calculation of a foundation

Kind of treatment: Vibro replacement

Single footing of 9.00 m² (3.00 m * 3.00 m) on 5 column(s)

Foundation level	1.50 m	Foundation pressure	130.00 kN/m2
------------------	--------	---------------------	--------------

Reference area 1.80 m2

Calculation depth	10.00 m
-------------------	---------

Depth of column foot 8.00 m

Depth of borrow hole	0.00 m
Ground water table	1.50 m

Properties of installed material (below load level)

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

No.	Top l. [m]	gamma [kN/m ³]	phi [°]	c [kN/m ²]	Dia. [m]	D [MN/m ²]	E [MN/m ²]	q [kN/m ²]	K
2	1.50	12.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
3	1.80	12.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
4	3.50	12.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
5	8.00	12.00	40.00	0.00	0.00	100.0	0.0	0.0	1.00
6	10.00	12.00	40.00	0.00	0.00	100.0	0.0	0.0	1.00

Properties of soil layers (from ground level)

No.	Top l. [m]	gamma [kN/m ³]	phi [°]	c [kN/m ²]	my	D [MN/m ²]	A-R	D-R	tau [kN/m ²]
1	0.00	20.00	34.00	0.00	0.30	20.00	*****	5.00	0.00
2	1.50	10.00	34.00	0.00	0.30	20.00	4.68	5.00	0.00
3	1.80	9.00	26.00	16.00	0.30	3.00	4.68	33.33	0.00
4	3.50	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	4.68	40.00	0.00
5	8.00	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	*****	40.00	0.00
6	10.00	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	*****	40.00	0.00

Top l. = top level of layer Dia. = column diameter
A-R = area ratio D-R = ratio of constraint moduli
D = constrained modulus E = Young's modulus
q = admissible stress at elastic deformation
K = mobilized coefficient of earth pressure
= in-situ measured value

Soil improvement

(Relevant for column sections with plastic deformations only!)

The initial support of the columns is considered with K = 1

The proportional load on columns is approximated to $m = 1 - 1/n$

Mutual support of columns occurs at 55 % of this limited system only

without depth factor:

No.	n0,0	n0,1	n0	d(A/AC)	n1,0	n1,1	n1	m1	phi1 [°]	c1 [kN/m ²]	D1 [MN/m ²]
1											
2	2.32	1.61	2.00	1.19	2.00	1.46	1.76	0.43	36.70	0.00	35.16
3	2.32	1.61	2.00	0.14	2.27	1.59	1.96	0.49	33.43	8.15	5.89
4	2.32	1.61	2.00	0.12	2.28	1.59	1.97	0.49	33.02	5.08	4.93
5											

Layer above the load level!

Layer without columns!

with depth factor:

No.	n0	n1	fd,0	fd	n2,0	n2	m2	phi2 [°]	c2 [kN/m ²]	D2 [MN/m ²]
1										
2	2.00	1.76	1.00	1.00 *)	1.86	1.76	0.43	36.70	0.00	35.16
3	2.00	1.96	1.33	1.37	3.02	2.70	0.63	35.33	5.93	8.09
4	2.00	1.97	1.54	1.62	3.51	3.19	0.69	35.84	3.13	7.98
5										

Layer without columns!

*) fd was reduced due to a compatibility control

n0 = basic improvement factor (n0,0 for grid and n0,1 for isolated column)
d(A/AC) = addition to the area ratio (to consider column compressibility)
n1 = amended improvement factor (column compressibility) (resp. n1,0 and n1,1)
(--> Recommended for failure analyses if n1 < n2)
fd = depth factor (overburden constraint) (fd,0 for grid)
n2 = further amended improvement factor (overburden constraint) (resp. n2,0)
m1,2 = proportional load on columns)
phi1,2 = friction angle of compound) attributable to n1 resp. n2
c1,2 = cohesion of compound)
D1,2 = constr. modulus of compound)

Settlement

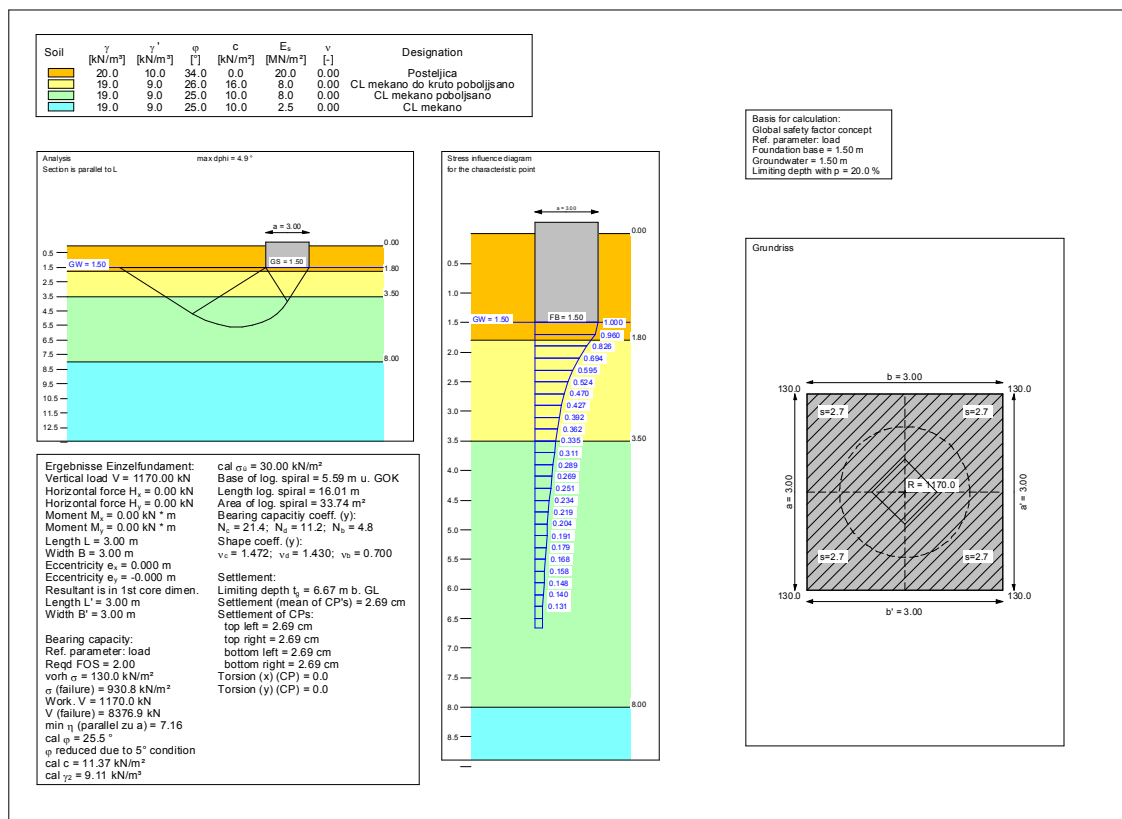
(at the latest terminated at a pressure ratio of 0.20)

Depth	Unlimited load area	Single foundation	the same without improvement	Over- burden	Found. pressure	Pressure ratio
-------	------------------------	----------------------	---------------------------------	-----------------	--------------------	-------------------

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

[m]	[cm]	[cm]		[cm]	[cm]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	
1.50	0.11	0.11	pl.	0.19	0.19	30.0	130.0	4.33
1.80	0.74	0.58	pl.	2.17	1.62	33.0	116.8	3.54
2.30	0.72	0.43	pl.	2.17	1.13	37.5	77.4	2.06
2.80	0.70	0.33	pl.	2.17	0.88	42.0	58.2	1.38
3.30	0.28	0.11	pl.	0.87	0.30	46.5	47.0	1.01
3.50	0.82	0.23	pl.	2.60	0.80	48.3	43.5	0.90
4.00	0.80	0.23	pl.	2.60	0.67	52.8	36.3	0.69
4.50	0.78	0.19	pl.	2.60	0.56	57.3	30.4	0.53
5.00	0.76	0.16	pl.	2.60	0.48	61.8	25.7	0.42
5.50	0.74	0.13	pl.	2.60	0.41	66.3	21.8	0.33
6.00	0.72	0.11	pl.	2.60	0.35	70.8	18.7	0.26
6.50	0.70	0.09	pl.	2.60	0.30	75.3	16.1	0.21
	7.86	2.69		25.76	7.67			

c) slijeganje temeljne stope nakon poboljšanja



5.1.4. Temeljna traka

Temeljne trake su širine 60 i 70 cm temeljene na dubini 1,0 m. Kontaktno naprezanje na temeljno tlo iznosi 160 kN/m². Osni razmak između šljunčanih stupova iznosi između 1,9 i 2,0 m, a dubina poboljšanja je 8 m. Utjecajna dubina iznosi oko 6 m.

Ulazni podaci proračuna:

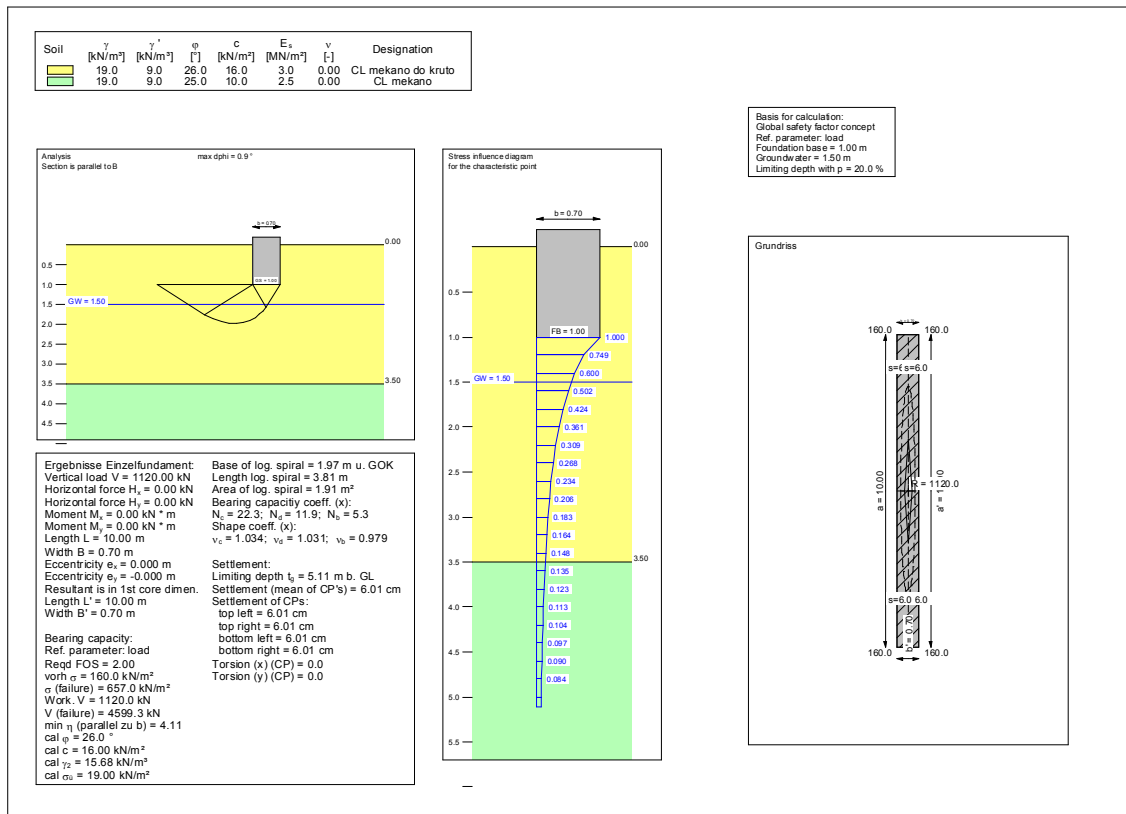
- računski promjer šljunčanih stupova $D = 0,8$ m;
- osni razmak šljunčanih stupova 2,0 m;
- prosječna dubina poboljšanja $H = 8$ m;
- kut unutarnjeg trenja drobljenog kamena $\phi_s = 40^\circ$;
- moduli stižljivosti tla $M_v = 3,0$ odnosno $2,5$ MN/m²;

Za te uvjete dobivene su slijedeće vrijednosti:

- površina koju pokriva jedan šljunčani stup $A = 1,4$ m²;
- osnovni faktor poboljšanja prema Priebe-u $n_0 = 1,9$;
- dio opterećenja koje preuzima šljunčani stup $m' = 0,5$;
- moduli stižljivosti zamjenskog materijala $M_v = 7,0$ do $7,4$ MN/m²;
- slijeganje temeljnog tla nakon poboljšanja $s = 2$ do 3 cm;

Numerički i grafički ispis geostatičkih proračuna dat je u nastavku.

a) slijeganje temeljne trake bez poboljšanja



5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

b) određivanje stupnja poboljšanja prema Priebe-u

SERVISNO POSLOVNI OBJEKT RUGVICA

Calculation of a foundation

Kind of treatment: Vibro replacement

Strip footing of 0.70 m width on 1 row(s), column distance 2.00 m

Foundation level	1.00 m	Foundation pressure	160.00 kN/m ²
Reference area	1.40 m ²		
Calculation depth	10.00 m		
Depth of column foot	8.00 m		
Ground water table	1.50 m		

Properties of installed material (below load level)

No.	Top l. [m]	gamma [kN/m ³]	phi [°]	c [kN/m ²]	Dia. [m]	D [MN/m ²]	E [MN/m ²]	q [kN/m ²]	K
2	1.00	19.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
3	1.30	19.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
4	1.50	12.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
5	3.50	12.00	40.00	0.00	0.70	100.0	0.0	0.0	1.00
6	8.00	12.00	40.00	0.00	0.00	100.0	0.0	0.0	1.00
7	10.00	12.00	40.00	0.00	0.00	100.0	0.0	0.0	1.00

Properties of soil layers (from ground level)

No.	Top l. [m]	gamma [kN/m ³]	phi [°]	c [kN/m ²]	my	D [MN/m ²]	A-R	D-R	tau [kN/m ²]
1	0.00	20.00	34.00	0.00	0.30	20.00	*****	5.00	0.00
2	1.00	20.00	34.00	0.00	0.30	20.00	3.64	5.00	0.00
3	1.30	19.00	26.00	16.00	0.30	3.00	3.64	33.33	0.00
4	1.50	9.00	26.00	16.00	0.30	3.00	3.64	33.33	0.00
5	3.50	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	3.64	40.00	0.00
6	8.00	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	*****	40.00	0.00
7	10.00	9.00	25.00	10.00	0.30	2.50	*****	40.00	0.00

Top l. = top level of layer Dia. = column diameter
A-R = area ratio D-R = ratio of constraint moduli
D = constrained modulus E = Young's modulus
q = admissible stress at elastic deformation
K = mobilized coefficient of earth pressure
= in-situ measured value

Soil improvement (Relevant for column sections with plastic deformations only!)

The initial support of the columns is considered with K = 1
The proportional load on columns is approximated to $m = 1 - 1/n$
Mutual support of columns occurs at 26 % of this limited system only

without depth factor:

No.	n _{0,0}	n _{0,1}	n ₀	d(A/AC)	n _{1,0}	n _{1,1}	n ₁	m ₁	phi ₁ [°]	c ₁ [kN/m ²]	D ₁ [MN/m ²]
1											
2	2.83	1.61	1.93	1.19	2.27	1.42	1.64	0.39	36.46	0.00	32.81
3	2.83	1.61	1.93	0.14	2.74	1.58	1.88	0.47	33.11	8.52	5.64
4	2.83	1.61	1.93	0.14	2.74	1.58	1.88	0.47	33.11	8.52	5.64
5	2.83	1.61	1.93	0.12	2.75	1.58	1.89	0.47	32.68	5.30	4.72
6											

Layer above the load level!

Layer without columns! with depth factor:

No.	n ₀	n ₁	fd ₀	fd	n _{2,0}	n ₂	m ₂	phi ₂ [°]	c ₂ [kN/m ²]	D ₂ [MN/m ²]
1										
2	1.93	1.64	1.00	1.21	2.10	1.99	0.50	37.10	0.00	39.72
3	1.93	1.88	1.20	1.24	3.27	2.33	0.57	34.55	6.85	7.00
4	1.93	1.88	1.25	1.32	3.43	2.48	0.60	34.88	6.46	7.43
5	1.93	1.89	1.43	1.56	3.94	2.95	0.66	35.47	3.40	7.36
6										

Layer above the load level!

Layer without columns!

n₀ = basic improvement factor (n_{0,0} for grid and n_{0,1} for isolated column)

5. Primjena šljunčanih pilota u zadaćama sanacija temeljnog tla, te ubrzanja njihova slijeganja

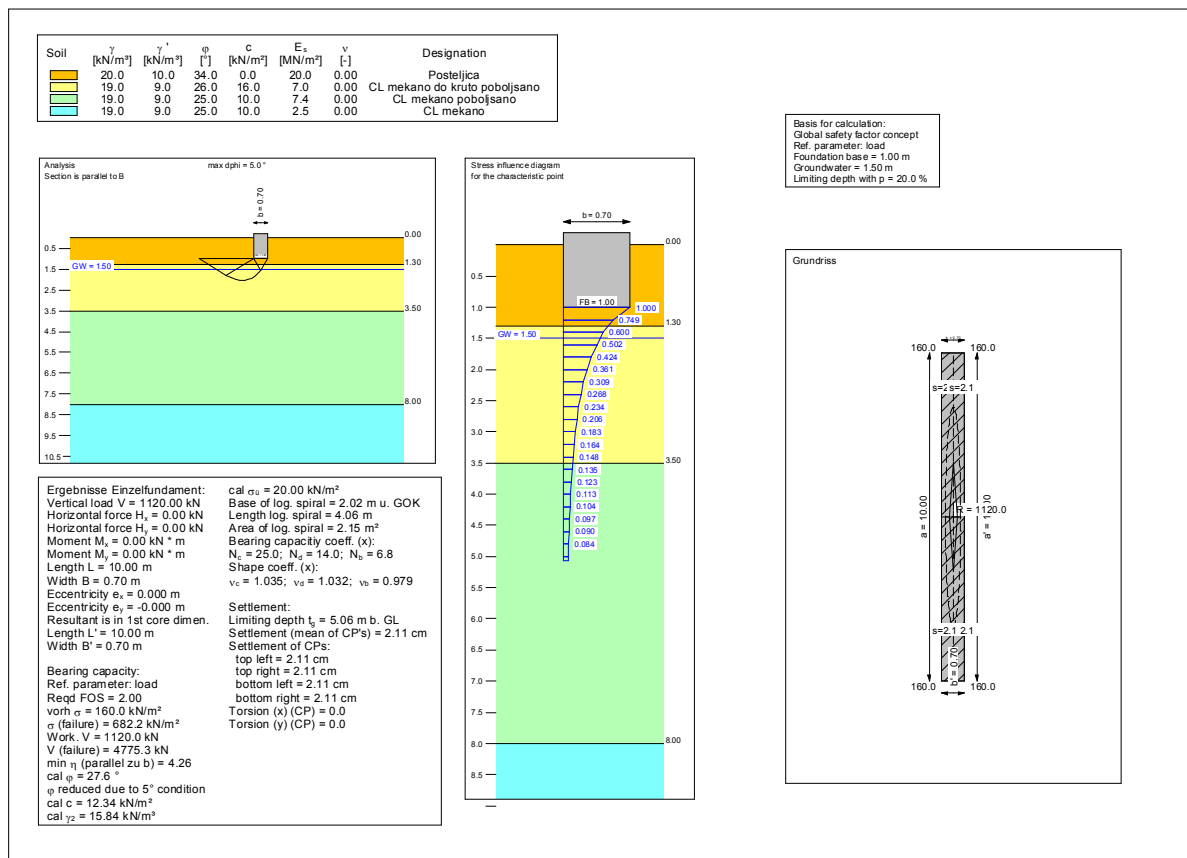
d(A/AC) = addition to the area ratio (to consider column compressibility)
n1 = amended improvement factor (column compressibility) (resp. n1,0 and n1,1)
(--> Recommended for failure analyses if n1 < n2)
fd = depth factor (overburden constraint) (fd,0 for grid)
n2 = further amended improvement factor (overburden constraint) (resp. n2,0)
m1,2 = proportional load on columns)
phi1,2 = friction angle of compound) attributable to n1 resp. n2
c1,2 = cohesion of compound)
D1,2 = constr. modulus of compound)

Settlement

(at the latest terminated at a pressure ratio of 0.20)

Depth	Unlimited load area	Strip foundation	the same without improvement		Over- burden	Found. pressure	Pressure ratio
[m]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[kN/m2]	[kN/m2]	
1.00	0.11	0.10 pl.	0.24	0.20	20.0	160.0	8.00
1.30	0.33	0.28 pl.	1.07	0.65	26.0	106.0	4.08
1.50	0.80	0.48 pl.	2.67	1.23	29.8	88.1	2.96
2.00	0.79	0.36 pl.	2.67	0.86	34.3	59.7	1.74
2.50	0.77	0.26 pl.	2.67	0.65	38.8	43.6	1.12
3.00	0.76	0.20 pl.	2.67	0.51	43.3	33.9	0.78
3.50	0.88	0.16 pl.	3.20	0.51	47.8	27.6	0.58
4.00	0.87	0.16 pl.	3.20	0.43	52.3	23.2	0.44
4.50	0.85	0.14 pl.	3.20	0.38	56.8	20.0	0.35
5.00	0.83	0.12 pl.	3.20	0.33	61.3	17.6	0.29
5.50	0.81	0.10 pl.	3.20	0.30	65.8	15.7	0.24
6.00	0.79	0.09 pl.	3.20	0.27	70.3	14.1	0.20
	8.59	2.47	31.17	6.31			

c) slijeganje temeljne trake nakon poboljšanja



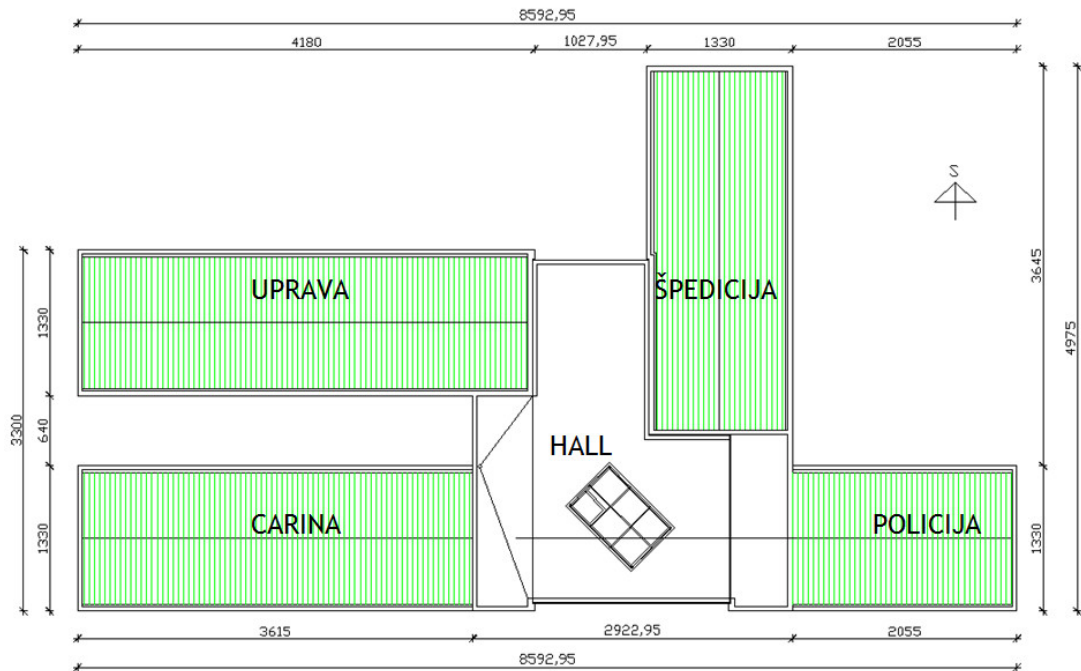
5.2. Projekt luka Ploče

Za potrebe izrade geotehničkog elaborata i glavnog projekta za ulazni terminal u Luku Ploče, objekt uprave i kontrole prometa i pripadne prometne površine INSTITUT IGH d.d., Zavod za geotehničko projektiranje, je izveo opsežne geotehničke istražne radove. Svrha ovih radova je bila dobivanje uvida u geotehnička obilježja lokacije i potrebnih podataka za izradu glavnog projekta.

5.2.1. Zgrada lučke uprave

Objekt se sastoji se od 4 poslovne jedinice – lučke uprave, carine, policije i špedicije koje su povezane središnjim dijelom u kojem se nalaze ulazni dio, info pult i dizalo koji povezuje sve jedinice u jedan zajednički povezani prostor. Tlocrtno objekt ima nepravilni oblik, ali zasebno svaka jedinica je pravilnog pravokutnog tlocrta. Poslovni dio zgrade carine i lučke uprave je tlocrtnih dimenzija 13,3 x 42,0 m, policije 26,38 x 13,3 m i zgrade špedicije 34,90 x 13,30 m, slika 15. Objekte se temelji na armiranobetonskoj ploči na prethodno poboljšanom tlu. Sve 4 poslovne jedinice su međusobno dilatirane.

Kako bi se objekt visinski povoljno smjestio u odnosu na trasu Spojne ceste potrebno je izvesti nasipavanje cijelog područja za oko 1,7 m što je s geotehničkog stajališta nepovoljno i uzrokovat će znatna slijeganja. Osim toga nasipavaju se i okolne prometne površine (parkirališta i interne prometnice) tako da će velika površina biti opterećena. Relativna kota objekta $\pm 0,00$ m je 3,2 m n.m, a teren se nalazi na koti oko 1,5 m n.m. Tlo na lokaciji je vrlo loših mehaničkih karakteristika i predstavlja iznimno nepovoljnu sredinu za temeljenje objekta.



Slika 15. Skica tlocrta objekta uprave i kontrole prometa

Koncepcija temeljenja objekta

Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja podataka o objektu i prethodnih iskustava stečenih tijekom izgradnje i praćenjem slijeganja u Čvoru Čeveljuša i objekata u sklopu Luke Ploče odabrano je temeljenje na ploči uz sustavno poboljšanje tla i uz predopterećenje. Predviđene mjere će osigurati nosivost plćih slabonosivih slojeva tla, ubrzati konsolidaciju, slijeganje objekta svesti na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirati mogućnost likvefakcije.

Glavnim geotehničkim projektom su predviđene sljedeće mjere:

- ugradnja šljunčanih pilota u membrani od geotekstila (geotextile-encased columns - GEC)
- ugradnja prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.)

-predopterećenje u iznosu većem od 30% od konačnog opterećenja objektom u trajanju minimalno 4 mjeseca

5.2.1.1. Sastav i karakteristike tla

Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja na širem području određene su sljedeće dvije geotehničke sredine:

GEOTEHNIČKA ZONA 1. [dubina od 0 do 10 m]: prema podacima koji su dobiveni in-situ ispitivanjima (CPTU i istražno bušenje) izrazito je heterogena. Sačinjavaju je pretežno pjeskoviti materijali s proslojcima/slojevima praha i gline niske plastičnosti, (SM, ML/SM i ML/CL);

debljina sloja:	$h = 10 \text{ m}$
zapreminska težina:	$\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$
nedrenirana posmična čvrstoća tla:	$c_u = 20 \text{ kPa}$
korigirana vrijednost otpora na vrhu:	$q_t = 0,6-1,35 \text{ MPa}$
broj udaraca SPP-a:	$N = 4-9$

GEOTEHNIČKA ZONA 2. [ispod 10 m]: sačinjavaju je pretežno prašnasti glinoviti materijali niske plastičnosti (CL/ML, ML), prisutni proslojci pijeska;

zapreminska težina:	$\gamma = 17-18 \text{ kN/m}^3$
nedrenirana posmična čvrstoća tla:	$c_u = 25-70 \text{ kPa}$
korigirana vrijednost otpora na vrhu:	$q_t = 0,5-1,8 \text{ MPa}$
broj udaraca SPP-a:	$N = 5-8$

Analizom rezultata ispitivanja tla statičkom penetracijom koji su dobiveni s lokacije, može se zaključiti da su fizikalne karakteristike slojeva tla i njihova distribucija po dubini ujednačeni. Tlo je saturirano podzemnom vodom tj. razina

podzemne vode je tijekom godine konstantno oko površine terena, od minimalno oko 50 cm ispod površine do plavljenja područja, a na dnevne oscilacije utječu plima i oseka. Razina podzemne vode u vrijeme ispitivanja je registrirana na koti od -0,1 m do -0,4 m od površine terena.

5.2.1.2. Tehničko rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

Tlo na lokaciji zgrade lučke uprave je građeno od mekih marinskih sedimenata male nosivosti i velike stišljivosti. Kako bi se osigurala nosivost plićih slabonosivih slojeva tla, ubrzala konsolidacija, slijeganje zgrade svelo na prihvatljivu razinu s aspekta uporabivosti i eliminirala mogućnost likvefakcije projektirano je sljedeće rješenje poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije:

- ugradnja šljunčanih pilota promjera 100 cm
- prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena
- predopterećenje u trajanju od minimalno 4 mjeseca

Šljunčani piloti se ugrađuju do dubine 10 m ispod površine terena (imaju dvojni ulogu poboljšanja tla i dreniranja), a polipropilenski drenovi do dubine 22 m ispod površine terena (ispod razine gdje je $\Delta\sigma_v = 20\%\sigma_g$). Dio tlocrta i presjeka prikazan je u nacrtima, Prilog 4.

Zahvat je podijeljen u tri zone poboljšanja tla:

ZONA 1 – Ispod nižih dijelova objekta. Šljunčani piloti u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 3,0 x 3,0 m. Između njih se ugrađuju prefabricirani drenovi u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,0 x 1,0 m.

ZONA 2 – Ispod središnjeg dijela objekta. Šljunčani piloti u trokutastom rasporedu na osnom razmaku 2,5 i x 2,8 m. Između njih se ugrađuju prefabricirani drenovi u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,25 x 1,25 m.

ZONA 3 – Između uprave i carine, nema opterećenja objektom. Nisu projektirani šljunčani piloti. Prefabricirani drenovi se ugrađuju u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,0 x 1,0 m.

Nakon ugradnje šljunčanih pilota i drenova tlo je potrebno predopteretiti nasipom do opterećenja većeg od 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja ispod temeljne ploče. Visina nasipa za predopterećenje je 3,5 m. Vrijeme predopterećenja je minimalno 4 mjeseca, a odluka o nastavku gradnje će se donijeti na osnovi obrade rezultata mjerenja.

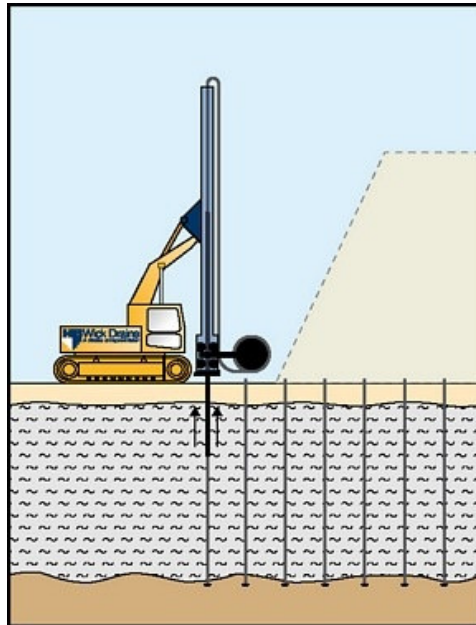
5.2.1.3. Polipropilenski drenovi

Ovim izvedbenim projektom je predviđeno ubrzanje konsolidacije ugradnjom drenova od polipropilena, dimenzija poprečnog presjeka 3 x 100 mm (tip COFRA MD7007 ili ekvivalent) do dubine 22 m ispod aktualne površine terena. Jezgra drenova od je izvedena od visokokvalitetnog polipropilena i smještena je u čvrst i izdržljiv filter od geotekstila koji ima veliku propusnost i omogućava slobodan prolaz vode, a također sprječava prolaz sitnih čestica iz okolnog tla.

Drenovi se ugrađuju u tlo uz pomoć čelične ovojnice za ugradnju (slika 16). Ova ovojnica (cijev) je malih dimenzija, neznatno većih od samog drena, zbog lakšeg prodiranja u tlo i da bi se što manje poremetilo tlo oko drena. Drenovi se ugrađuju statičkim utiskivanjem ovojnice s drenom u tlo. Ugradnja ovojnice vibriranjem nije dopušteno zbog mogućnosti oštećenja drena prilikom ugradnje. Treba izbjegavati naknadni iskop ispod kote s koje se izvode drenovi. Iskustva pokazuju da se ovim postupkom oštećuje i čupa veliki broj drenova (preko 30 %).

5.2.1.4. Šljunčani drenovi

Šljunčani piloti imaju ulogu poboljšanja mehaničkih karakteristika tla (povećanje nosivosti i smanjenje slijeganja) jer se tlo bočno zbija i određeni volumen tla ispunjava kamenim materijalom (šljunkom ili drobljenim kamenom) boljih mehaničkih karakteristika.



Slika 16. Shematski prikaz ugradnje polipropilenskih drenova

Predviđena je ugradnja šljunčanih pilota promjera 100 cm, u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 3,0 x 3,0 m ispod nižih dijelova zgrade i u trokutnom rasporedu na osnom razmaku 2,5 m i 2,8 ispod viših dijelova zgrade. Dubina ugradnje je 10 m ispod aktuelne površine terena.

Šljunčani piloti se ugrađuju metodom dubinskog vibracijskog zbijanja (vibro compaction), metoda punjenja odozdo prema gore, gdje se tlo bočno zbija i određeni volumen popunjava kamenim materijalom ugrađenim do traženog modula zbijenosti.

5.2.1.5. Kontrola uspješnosti poboljšanja tla

Kontrola uspješnosti poboljšanja tla provodi se ispitivanjem mehaničkih karakteristika tla i usporedbom podataka dobivenih prije i nakon zahvata. Kako bi se mogao donijeti zaključak o uspješnosti poboljšanja osnovnog tla predviđena je izvedba 3 CPTU ispitivanja do dubine 30 m na prethodno izvedenim položajima nakon faze predopterećenja. Položaji su prikazani u nacrtu.

5.2.1.6. Redoslijed izrade zahvata poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

Radovi na poboljšanju tla i ubrzanju konsolidacije se sastoje od sljedećih faza:

1. Skidanje površinskih oko 30 cm vegetacijskog pokrova i humusa.
2. Postavljanje netkanog geotekstila. Geotekstil služi za razdvajanje zemljanog i kamenog materijala.
3. Postavljanje sloja nasipa od drobljenog drenažnog kamenog materijala (granulacije 32-63 mm) debljine 80 cm uz zbijanje završnog sloja na modul stišljivosti $M_s \approx 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
4. Izvedba šljunčanih pilota promjera $\Phi 100$ cm, duljine 10,0 m u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 3,0 m i u trokutnom rasporedu 2,5 m i 2,8 m.
5. Ugradnja prefabriciranih geosintetičkih vertikalnih drenova od polipropilena tipa COFRA MD7007 ili ekv. do dubine 22,0 m između šljunčanih pilota u kvadratnom rasporedu na osnom razmaku 1,0 – 1,25 m.
6. Planiranje izdignute površine nakon izvođenja pilota i drenova i zbijanje na modul stišljivosti $M_s \geq 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
7. Izvedba prvog sloja nasipa od kamenog materijala do donje kote temeljne ploče tj. do kote $-1,25$ m = $-1,95$ m n.m
8. Ugradnja horizontalnih inklinometara i vertikalnih deformetara za opažanje slijeganja tla. Predviđena su tri mjerna polja koja sadrže horizontalni inklinometar duljine 20 m i vertikalni deformetar duljine 40 m.

9. Predopterećenje tla nasipom visine 3,5 m, tj. 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja ispod temeljne ploče. Visina predopterećenja je $H=(50/18)*1,3\approx 3,5$ m. S obzirom na očekivao slijeganje od 65 cm uzrokovano nasipom visine 3,5 m treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja

10. Skidanje predopterećenja, planiranje na donju kotu temeljne ploče uz zbijanje do modula stišljivosti $M_s \geq 60$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.

11. Izvedba temeljne ploče i objekta.

Ukupno šljunčanih pilota $\Phi 100$ cm, $L=10,0$ m:	$N=361$ kom = 3610 m'
Ukupno polipropilenskih drenova $L=22,0$ m:	$N=2860$ kom = 62920 m'

5.2.2. Parkiralište

Predviđene su sljedeće mjere:

- ugradnja prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.)
- predopterećenje u iznosu većem od 30% od konačnog opterećenja u trajanju minimalno 4 mjeseca

Predviđene mjere će osigurati nosivost plićih slabonosivih slojeva tla, ubrzati konsolidaciju i slijeganje nasipa svesti na prihvatljivu razinu.

5.2.2.1. Sastav i karakteristike tla

Na osnovi rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja na širem području određene su sljedeće dvije geotehničke sredine:

GEOTEHNIČKA ZONA 1. [dubina od 0 do 10 m]: prema podacima koji su dobiveni in-situ ispitivanjima (CPTU i istražno bušenje) izrazito je heterogena. Sačinjavaju je pretežno pjeskoviti materijali s proslojcima/slojevima praha i gline niske plastičnosti, (SM, ML/SM i ML/CL);

debljina sloja:	$h=10$ m
zapreminska težina:	$\gamma=16$ kN/m ³
nedrenirana posmična čvrstoća tla:	$c_u=20$ kPa
korigirana vrijednost otpora na vrhu:	$q_t=1,35$ MPa
broj udaraca SPP-a:	$N=4-9$

GEOTEHNIČKA ZONA 2 [dubina od 10 do 16 (21) m]: sačinjavaju je pretežno prašinski i glinoviti materijali niske plastičnosti (CL/ML, ML), prisutni proslojci pijeska;

debljina sloja:	$h=6$ (10) m
zapreminska težina:	$\gamma=16$ kN/m ³
nedrenirana posmična čvrstoća tla:	$c_u=30$ kPa
korigirana vrijednost otpora na vrhu:	$q_t=1,0$ MPa
broj udaraca SPP-a:	$N=5-8$

Analizom rezultata ispitivanja tla statičkom penetracijom koji su dobiveni s lokacije, može se zaključiti da su fizikalne karakteristike slojeva tla i njihova distribucija po dubini ujednačeni. Tlo je saturirano podzemnom vodom tj. razina podzemne vode je tijekom godine konstantno oko površine terena, od minimalno oko 50 cm ispod površine do plavljenja područja, a na dnevne

oscilacije utječu plima i oseka. Razina podzemne vode u vrijeme ispitivanja je registrirana na koti od -0,1 m do -0,4 m od površine terena.

Opis zahvata

Tlo na lokaciji je građeno od mekih marinskih sedimenata male nosivosti i velike stišljivosti. Predviđeno je uređenje parkirališta i pratećih prometnih površina oko Zgrade uprave i kontrole prometa i spojne ceste.

Lokacija A-Vanjsko parkiralište za kamione unutar vlasničke granice Luke Ploče

Lokacija je ukupne površine 26 485 m² uključujući i objekt uprave i kontrole prometa koji zauzima površinu od oko 2400 m². Radi usklađivanja visina prometnih površina predviđena je prosječna gornja kota parkirališta na 3,20 m n.m. (relativna kota $\pm 0,00$). Zbog uzdužnih i poprečnih padova visine se kreću u rasponu 2,91 – 4,84 m n.m. Kako se teren nalazi na koti 1,24 – 1,95 m n.m., prosječno 1,60 m n.m., potrebno je izvesti nasipavanje u prosječnoj visini 1,6 m, a maksimalno oko 3,2 m. Nasipavanje je s geotehničkog stajališta nepovoljno i uzrokovat će znatno slijeganje. Predmetna lokacija nije korištena tj. na površini se nalazi autohtoni materijal i vegetacija tipična za močvarna područja.

Kako bi se ubrzala konsolidacija tla predviđa se ugradnja prefabriciranih vertikalnih drenova od polipropilena (tip Cofra MD7007 ili ekv.). Drenovi se ugrađuju do dubine 20 m ispod površine terena (razina gdje je $\Delta\sigma_v = 20\%\sigma_g$) u kvadratnom rasporedu, na osnom razmaku 1,5 x 1,5 m.

Nakon ugradnje navedenih drenova tlo je potrebno predopteretiti nasipom minimalno 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja, tj. u visini

60 – 140 cm. Vrijeme predopterećenja je minimalno 4 mjeseca, a odluka o nastavku gradnje će se donijeti na osnovi obrade rezultata mjerenja.

Lokacija B-Parkiralište za kamione unutar kompleksa Luke Ploče

Lokacija je ukupne površine 12 927 m². Radi usklađivanja visina prometnih površina predviđena je gornja kota na prosječno oko 2,60 m n.m. Zbog uzdužnih i poprečnih padova visine se kreću u rasponu 2,95 – 2,46 m n.m. Kako se teren nalazi na koti 1,63 - 1,93 m n.m., prosječno 1,80 m n.m., potrebno je izvesti nasipavanje u prosječnoj visini 0,8 m što će uzrokovati slijeganje tla. Predmetna lokacija se djelomično koristi tj. djelomično je uređena kao plato od kamenog materijala. Kako predviđena nasipavanja nisu velika, nije nužno ubrzanje konsolidacije. Tlo je potrebno predopteretiti nasipom minimalno 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja, tj. u visini oko 30 – 40 cm. Vrijeme predopterećenja je minimalno 4 mjeseca, a odluka o nastavku gradnje će se donijeti na osnovi obrade rezultata mjerenja.

Način ugradnje polipropilenskih drenova je kao na slici 16. Kontrola i opažanja su kao i kod izvedbe zgrade lučke uprave.

5.2.2.2. Redoslijed izrade zahvata poboljšanja tla i ubrzanja konsolidacije

Lokacija A

1. Skidanje površinskih oko 30 cm vegetacijskog pokrova i humusa.
2. Postavljanje netkanog geotekstila. Geotekstil služi za razdvajanje zemljanog i kamenog materijala.
3. Postavljanje sloja nasipa od drobljenog drenažnog kamenog materijala (granulacije 32-63 mm) debljine 80 cm uz zbijanje završnog sloja na modul stišljivosti $M_s \approx 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.

4. Ugradnja prefabriciranih geosintetičkih vertikalnih drenova od polipropilena tipa COFRA MD7007 ili ekv. do dubine 20,0 m u kvadratnom rasporedu na osnovom razmaku 1,5 m.
5. Planiranje izdignute površine nakon izvođenja drenova i zbijanje na modul stišljivosti $M_s \geq 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
6. Izvedba prvog sloja nasipa od kamenog materijala debljine 50 cm
7. Ugradnja horizontalnih inklinometara za opažanje slijeganja tla. Predviđena su četiri horizontalna inklinometra duljine 30 m.
8. Izvedba nasipa od kamenog materijala .
9. Predopterećenje tla nasipom opterećenja 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja tj. u visini 60 – 140 cm. S obzirom na očekivano slijeganje uzrokovano nasipom treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja.
10. Skidanje predopterećenja, planiranje na kotu kolničke konstrukcije i izvedba kolničke konstrukcije

Ukupno polipropilenskih drenova $L=20,0$ m: $N=10\ 879$ kom = 217 580 m'

Lokacija B

1. Skidanje površinskih oko 30 cm vegetacijskog pokrova i humusa.
2. Postavljanje netkanog geotekstila. Geotekstil služi za razdvajanje zemljanog i kamenog materijala.
3. Postavljanje sloja nasipa od drobljenog drenažnog kamenog materijala (granulacije 32-63 mm) debljine 80 cm uz zbijanje završnog sloja na modul stišljivosti $M_s \approx 40$ MPa mjereno metodom kružne ploče $\Phi 30$ cm.
4. Izvedba prvog sloja nasipa od kamenog materijala debljine 50 cm.
5. Ugradnja horizontalnih inklinometara za opažanje slijeganja tla. Predviđena su dva horizontalna inklinometra duljine 30 m.
6. Izvedba nasipa od kamenog materijala.
7. Predopterećenje tla nasipom opterećenja 30% većeg intenziteta od konačnog opterećenja tj. u visini 30 – 40 cm. S obzirom na očekivano slijeganje

uzrokovano nasipom treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja.

8. Skidanje predopterećenja, planiranje na kotu kolničke konstrukcije i izvedba kolničke konstrukcije.

5.2.2.2. Predopterećenje

Kako bi se omogućila primarna i djelomična sekundarna konsolidacija tla, a time naknadna ukupna i diferencijalna slijeganja smanjila na prihvatljivu mjeru s aspekta uporabivosti, tlo je potrebno opteretiti nasipom minimalno 30% većeg intenziteta opterećenja od konačnog opterećenja, tj. 60 – 140 cm za lokaciju A i 30 – 40 cm za lokaciju B. Planirano vrijeme predopterećenja je minimalno 4 mjeseca, a odluka o nastavku gradnje će se donijeti na osnovi obrade rezultata mjerenja. S obzirom na očekivano slijeganje uzrokovano nasipom treba predvidjeti nadogradnju predopterećenja sukcesivno sa realizacijom slijeganja. Težina predviđenog predopterećenja (30 – 70 cm tj. oko 0,6 – 1,5 t/m² površine) je podjednaka težini vozila.

5.2.2.3. Opažanje slijeganja

Kako bi se moglo kontrolirati ostvareno slijeganje od predopterećenja, i prognozirati daljnja slijeganja, predviđena je ugradnja mjerne opreme u šest mjernih polja koja sadrže horizontalni inklinometar duljine 30 m. Ujedno je predviđeno praćenje slijeganja pomoću dvadeset geodetskih repera.

Mjerenja je potrebno provoditi u vremenskim intervalima od oko 15 dana u periodu od minimalno 4 mjeseca tj. do smirivanja slijeganja.

6. Proračun ubrzanja vremenskog toka slijeganja na projektu TS Sisak

Na predmetnoj lokaciji u Sisku planira se izgradnja transformatorske stanice. Teren je blago zakošen s rasponom kota cca 103 – 98 m n.m. i padom terena u smjeru jugoistok – sjeverozapad. Tlocrtna površina zahvata lokacije je cca 3400 m², Prilog 1 i 2.

U sklopu buduće trafostanice planirano je izvođenje različitih vrsta objekata s obzirom na geometrijske karakteristike i vrijednosti računskih opterećenja. S obzirom na projektne zahtjeve kote nula objekta, potrebno je izvesti i nasip promjenjive debljine. Ovim je projektom dano rješenje sanacije temeljnog tla u smislu ubrzanja konsolidacionih procesa u slabije propusnim slojevima, te njegovo ojačanje ispod jače opterećenih objekata.

U geotehničkom elaboratu, izrađenom od strane poduzeća GEOKOD d.o.o., provedena je proračunska analiza vremenskog toka slijeganja ispod nasipa debljine 3 m. Rezultati pokazuju da je za 80% konsolidaciju slabije propusnih slojeva gline i organske gline potrebno 5 – 6 godina. To je neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje, zbog kojega bilo potrebno iznaći rješenje za ubrzanje slijeganja i/ili ojačanja tla.

6.1. Opis tehničkog rješenja

Predviđa se izvedba šljunčanih pilota s dvostrukim ciljem. Na dijelu gdje nema novih objekata na nasipu, uloga šljunčanih pilota je dominantno za ubrzanje konsolidacije, dok je sporedni efekt (ne zanemarivi) ojačanje temeljnog tla. Ispod objekata, gdje su definirana vanjska djelovanja relativno velika,

situacija je obrnuta. Šljunčani piloti prvenstveno imaju ulogu ojačanja temeljnog tla, uz sekundarno (isto tako ne zanemarivo) djelovanje ubrzivača vremenskog toka slijeganja. Za slučaj kada se izvode šljunčani piloti ojačani cementom otpada funkcija pilota kao drena.

Ispod nasipa su predviđeni šljunčani piloti promjera 40 cm ($l = 7, 10$ i 13 m) na kvadratnom razmaku $s = 2.5$ m. Ispod objekata je računski promjer 70 cm ($l = 7, 10$ i 13 m) s različitim tlocrtnim rasporedom u funkciji projektnog opterećenja. Ispod objekata zgrade i trafoa predviđa se izvedba šljunčanih pilota ojačanih cementom (Prilog 2).

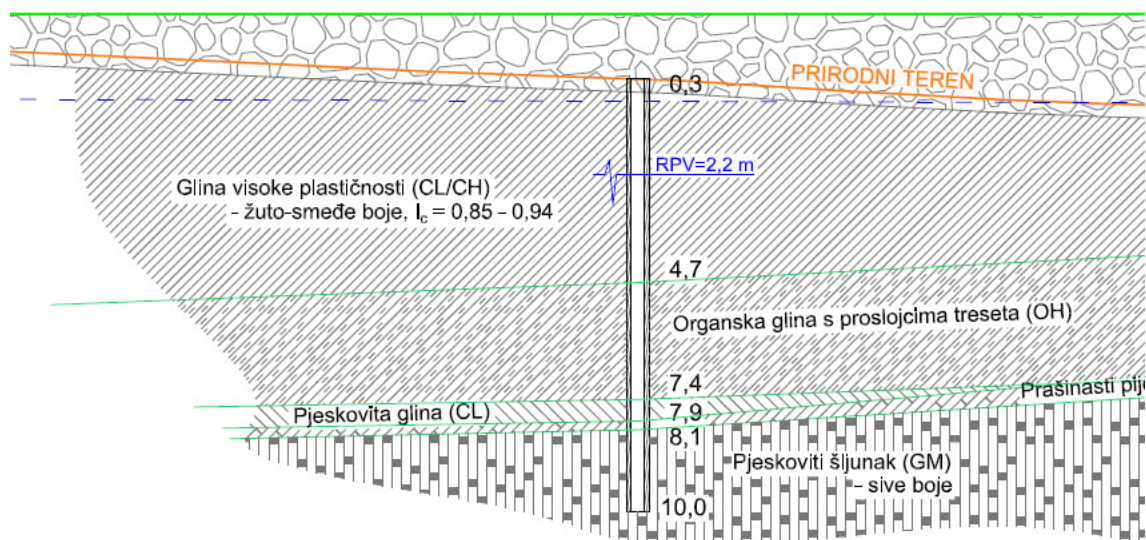
Ubrzanje vremenskog toka slijeganja provodi se za opterećenje budućim nasipom. Dužina trajanja ubrzanog vremenskog slijeganja, a temeljem zahtjeva vezanih za dopuštena slijeganja u eksploataciji, definirana je ovim projektom. Nasip se izvodi s nadvišenjem od $H = 0.5$ m, radi omogućavanja ostvarenja procesa sekundarne konsolidacije za prvi desetogodišnji inkrement.

Na dijelu tlocrta nema promjene u odnosu na zatečeno stanje. Ne mijenja se kota zatečenog terena, odnosno na tom dijelu isklinjava nasip. Isto tako nema novih opterećenja u smislu pojave građevina na spomenutom dijelu tlocrta. Iz tog razloga nisu predviđeni zahvati poboljšanja tla.

Proračunom vremenskog toka konsolidacije metodom konačnih diferencija za dva slabo propusna sloja gline CL/CH i organske gline OH na lokaciji TS Sisak, utvrđeno je da će se 80% slijeganja ostvariti za 10 godina. Ovo vremensko razdoblje primarne konsolidacije je neprihvatljivo dugo. Potrebno je ubrzati proces konsolidacije slabo propusnih slojeva. Odabire se rješenje korištenjem šljunčanih stupova promjera $d = 40$ cm na kvadratnom razmaku $s = 2.5$ m.

6.2. Proračun vremenskog toka slijeganja

Na slici 17 je dan proračunski presjek za analizu vremenskog toka slijeganja.



Slika 17. Proračunski presjek slojeva

Proračunski parametri slabije propusnih slojeva tla dani su u slijedećoj tablici:

Tablica 2: Tlo na lokaciji 2

Sloj	Koeficijent vodopropusnosti k [m/s]	Modul stižljivosti M_v [kN/m ²]	Debljina sloja d [m]
CL/CH (sloj 1)	$k_1 = 3.68 \times 10^{-11}$	$M_{v1} = 5000$	4.7
OH (sloj 2)	$k_2 = 3.5 \times 10^{-10}$	$M_{v2} = 1200$	3.3

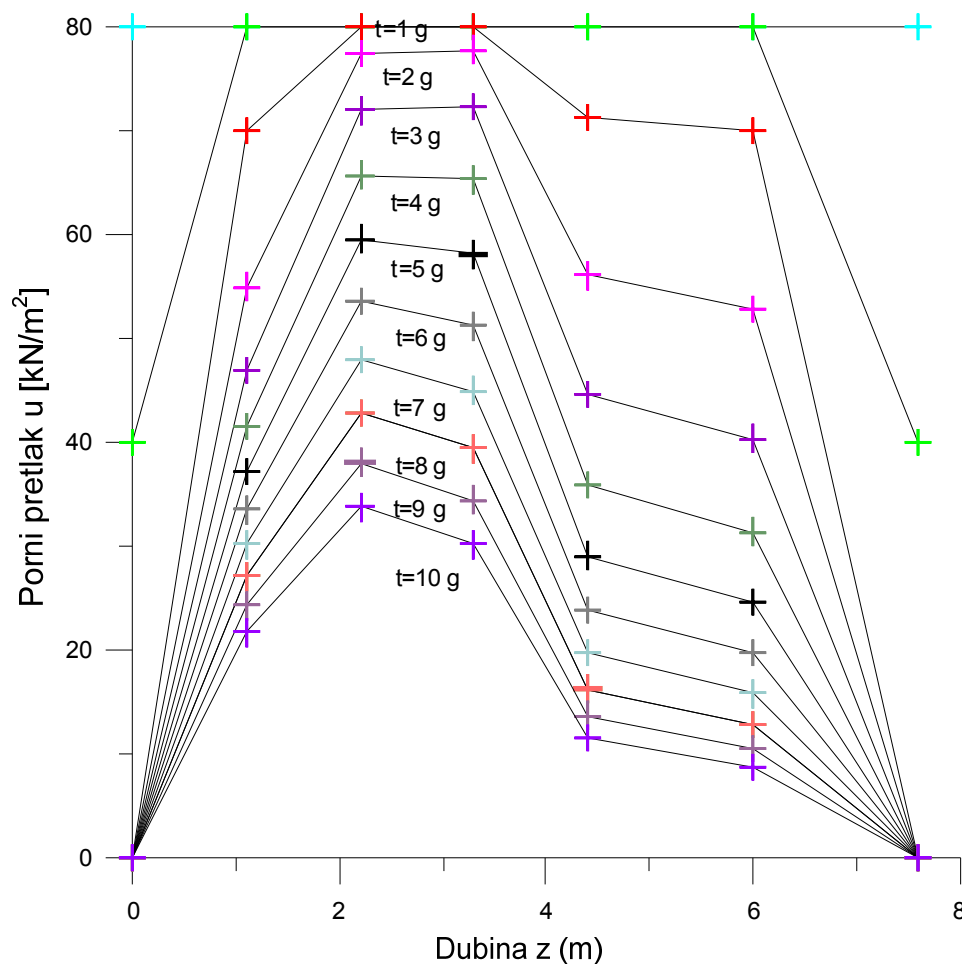
Analiza je provedena korištenjem numeričkog postupka s konačnim diferencijama za dva sloja različitih vrijednosti koeficijenata vodopropusnosti.

U slijedećoj tablici su vrijednosti pornih predtlakova za razdoblje do 10 godina:

Tablica 3: Proračun pornih tlakova

sloj	z [m]	t = 0 ⁻	t = 0 ⁺	t = 1g	t = 2g	t = 3g	t = 4g	t = 5g	t = 6g	t = 7g	t = 8g	t = 9g	t = 10g
CL/ CH	0	80	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.1	80	80	70	55	46.9	41.5	37.2	33.5	30.2	27.1	24.3	21.7
	2.2	80	80	80	77.5	72	65.8	59.6	53.6	48	42.8	38.1	33.8
	3.3	80	80	80	77.8	72.3	65.3	58.1	51.2	45	39.4	34.5	30.2
OH	4.4	80	80	71.3	56.1	44.6	35.9	29.1	23.9	19.7	16.3	13.7	11.5
	6.0	80	80	70	52.8	40.4	31.4	24.7	19.7	15.8	12.8	10.5	8.7
	7.6	80	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

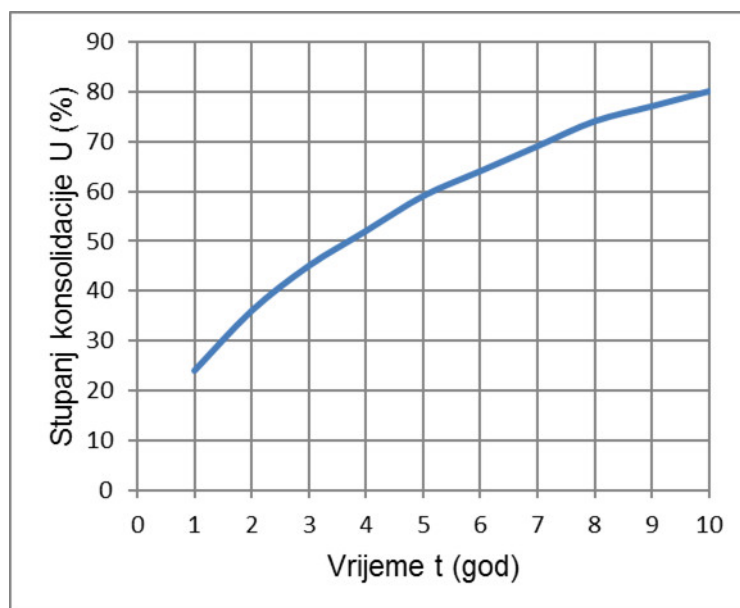
Na slici 18 je dan grafički prikaz vrijednosti pornih predtlakova u funkciji vremena.



Slika 18. Promjena pornog tlaka s dubinom ovisno o vremenu

Veličina ostvarenog slijeganja (u postotnom iznosu) jednaka je relativnoj vrijednosti pada pornog predtlaka u promatranom vremenskom razdoblju, a nastala je kao posljedica odgovarajuće promjene efektivnih naprezanja.

Na slijedećoj slici je dan prikaz postotka disipacije pornog predtlaka u vremenu. Vidljivo je da će se 80 % slijeganja ostvariti za 10 g. Ovo je vremensko razdoblje primarne konsolidacije neprihvatljivo dugo.



Slika 19. Stupanj konsolidacije u vremenu

6.3. Proračun ubrzanje konsolidacije

Proračun se provodi za ekvivalentni, obostrano drenirani sloj.

Za:

$$U_v = 0.8$$

$$t = 10 \text{ god}$$

$$T_v = 0.567$$

$$T_v = c_v \times t / H^2$$

$$c_v = T_v \times H^2 / t = 0.567 \times 4^2 / 10 = 0.90 \text{ m}^2/\text{god}$$

$$k = c_v \times \gamma_w / M_v = 0.90 \times 9.81 / [(5000 + 1200) \times 0.5] = 0.00285 \text{ m/god}$$

$$= 0.00285 / (365 \times 86400) = 9.0 \times 10^{-11} \text{ m/s}$$

Za slabije propusne slojeve s evidentiranom uslojenošću jače propusnog sloja (glina s tresetom) odabrano:

$$c_h = c_v \times 5 = 0.9 \times 5 = 4.5 \text{ m}^2/\text{god}$$

Ukupno slijeganje (primarno + sekundarno) slabo propusnih slojeva:

$$w = 80 \times 8 / 3100 = 0.206 \text{ m}$$

Neka je nakon tri mjeseca ($t = 0.25$ god) dozvoljeno slijeganje od 2 cm. U tom slučaju je zajednički ciljani stupanj konsolidacije:

$$U = (20.6 - 2.0) / 20.6 = 0.90$$

Polumjer šljunčanog stupnjaka te radijus djelovanja:

$$r_d = 0.2 \text{ m} \quad (\text{promjer } d = 0.4 \text{ m})$$

$$R = n \times r_d = n \times 0.2$$

$$T_v = 0.9 \times 0.25 / 4^2 = 0.0141$$

$$U_v = (4 \times 0.0141 / 3.14)^{0.5} = 0.134$$

$$T_r = c_h \times t / (4 \times R^2) = 4.5 \times 0.25 / (4 \times 0.2^2 \times n^2) = 7.0 / n^2$$

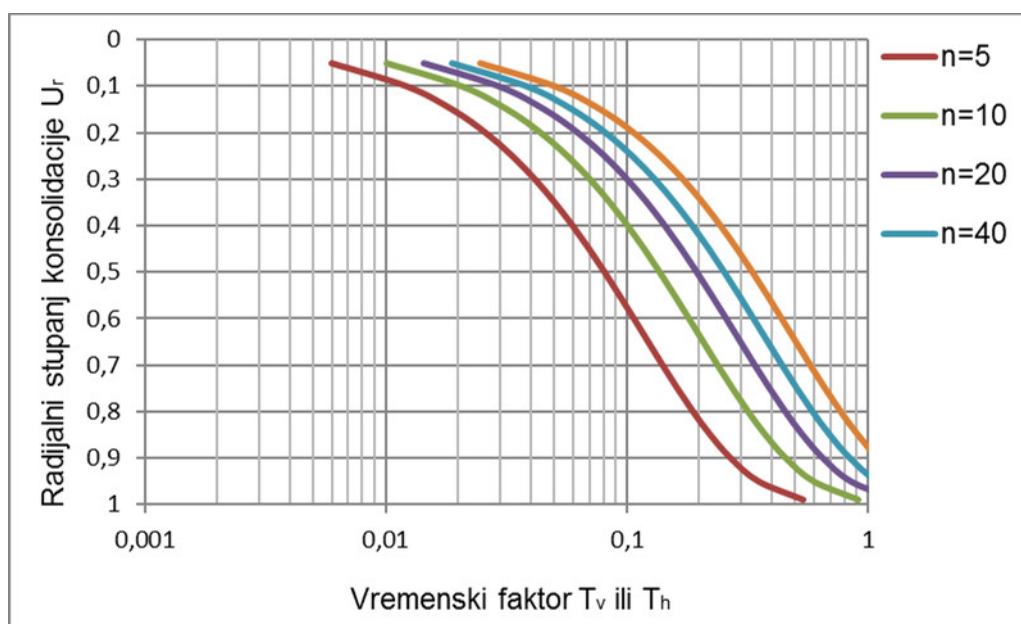
Iz vrijednosti zajedničkog stupnja konsolidacije U može se dobiti potrebna vrijednosti stupnja konsolidacije za radijalno dreniranje:

$$(1 - U) = (1 - U_v)(1 - U_r)$$

$$(1 - 0.9) = (1 - 0.134)(1 - U_r)$$

$$U_r = 0.88$$

Na slijedećoj slici grafički je prikazana veza stupnja konsolidacije u radijalnom smjeru U_r , vremenskog faktora slijeganja T_r i broja n .



Slika 20. Radijalni stupanj konsolidacije u ovisnosti o T_r i n

Očitano za $n = 5$ i $U_r = 0.88$ $T_r = 0.15$

Iz slijedećeg odnosa se određuje broj n :

$$T_r = 7.0/n^2$$

$$n = (7.0/T_r)^{0.5} = (7.0/0.15)^{0.5} = 6.8$$

Odabrano $n = 7$

$$R = 0.2 \times 7 = 1.4$$

Potrebni razmak drenova za pravokutni raspored:

$$s = R/(0.565) = 1.4/0.565 = 2.48 \text{ m}$$

Odabrano $s_{od} = 2.5 \text{ m}$

7. Zaključak

Konsolidacija tla, odnosno vremenski tok njegova slijeganja, je funkcija više čimbenika. Slijeganje tla se, osim dominantno u vertikalnom, odvija i u preostala dva, horizontalna smjera. Prirodno tlo je generalno heterogeno i anizotropno u svim smjerovima sa međusobno različitim vrijednostima parametara deformabilnosti. U cilju iznalaženja rješenja zadaće procjene vrijednosti slijeganja uvode se potrebne pretpostavke i pojednostavljenja realnog ponašanja. Analitičko rješenje vremenskog toka slijeganja tla u jednom smjeru dao je Karl Terzaghi.

Slijeganje sitnozrnatih vrsta tla se odvija u dužem vremenskom razdoblju. Pri rješavanju različitih vrsta inženjerskih problema nužno je poznavati vrijednosti ostvarenih slijeganja, neovisno o tome u kojem trenutku se ona ostvaruju. Upravo će vrijednosti slijeganja diktirati relevantnost određenih tehničkog rješenja.

U određenim inženjerskim zadaćama ostvarenje predviđenih slijeganja tla traje neprihvatljivo dugo vremensko razdoblje. U takvim slučajevima potrebno je ubrzati spomenuti proces vremenskog slijeganja, odnosno konsolidacije tla. Ono se provodi ugradnjom drenaže u tlu i predopterećenjem površine. Dreniranjem se skraćuje put vodi u tlu, što dovodi do bržeg slijeganja.

Na prikazanom projektnom rješenju u Rugvici, slijeganja su smanjena sa predviđenih 8,5 cm na 2,5 do 3 cm i to ugradnjom šljunčanih stupova na razmaku 1,50 m ispod temeljne stope te smanjenje sa predviđenih 6,0 cm na 2 do 3 cm ispod temeljne trake sa razmakom šljunčanih pilota od 2 m.

Na projektu Lučke uprave u Pločama predviđeno bi slijeganje zbog nasipavanja od 1,7 m bilo neprihvatljivo te su se poduzele mjere ubrzanja slijeganja sa šljunčanim pilotima promjera 100 cm do dubine 10 m i prefabriciranim polipropilenskim drenovima 3 x 100 mm dubine do 22 m.

Proračunom slijeganja tla na projektu TS Sisak utvrđeno je 80 % konsolidacije u vremenskom razdoblju od 10 godina što je neprihvatljivo dugo razdoblje. Ugradnjom šljunčanih drenova koji su imali dvostruku ulogu, i to, na dijelu gdje nema novih objekata na nasipu, uloga šljunčanih pilota je dominantno za ubrzanje konsolidacije, dok je sporedni efekt ojačanje temeljnog tla. Ispod objekata, gdje su definirana vanjska djelovanja relativno velika, situacija je obrnuta. Željeno vrijeme u kojem bi se trebala odviti konsolidacija je tri mjeseca i to maksimalno do 2 cm. To znači da će se 90 % od ukupne konsolidacije odviti u ta tri mjeseca i to maksimalno 2 cm. Proračunski razmak drenova je 2,5 m.

Primjena šljunčanih pilota i/ili prefabriciranih drenažnih sustava se pokazuje kao optimalno rješenje na nizu inženjerskih zadaća širokog raspona problema. Potrebno je, uz detaljnu provedbu istražnih radova, i dobro poznavanje načina i tehnologije rada spomenutih postupaka.

Literatura

KNJIGE:

1. Nonveiller, E. (1979). *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Zagreb: Školska knjiga.
2. Roje-Bonacci, T. (2007). *Mehanika tla*. Treće izdanje. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
3. Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundations*. Treće izdanje. USA: John Wiley & Sons.
4. Kvasnička, P., Domitrović, D. (2007). *Mehanika tla*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet

ČLANCI:

Veinović, Ž., Kovačević-Zelić, B., Kvasnička, P. (2003). Laboratorijsko mjerenje koeficijenta propusnosti tla – usporedba konvencionalnih i novih metoda. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. Vol. 15, str. 95-102.

Popis slika

Slika 1. Mehanički model konsolidacije	3
Slika 2. Dijagrami procesa konsolidacije	6
Slika 3. Element tla u sloju debljine	7
Slika 4. Izokrone za dani T_v	11
Slika 5. Krivulja vremenskog toka slijeganja; krivulja ovisnosti stupnja konsolidacije U o bezdimenzionalnom vremenskom faktoru T_v	12
Slika 6. Ovisnost radijalne konsolidacije oko drena za različite načine opterećivanja površine.	14
Slika 7. Prosječni stupanj konsolidacije s vertikalnim drenovima	16
Slika 8. Shema mjerenja koeficijenta propusnosti s promjenjivim padom potencijala	18
Slika 9. Shema uređaja za određivanje koeficijenta propusnosti metodom zadanog protoka	19
Slika 10. Crpljenje iz bunara	21
Slika 11: Granice primjene postupka dubinskog vibracijskog zbijanja	23
Slika 12. Postupak izvođenja šljunčanih drenova vibriranjem	24
Slika 13. Postupak zbijanja u vezanim tlima	25
Slika 14. Raspored drenova i utjecajni faktor rasporeda R	31
Slika 15. Skica tlocrta objekta uprave i kontrole prometa	43
Slika 16. Shematski prikaz ugradnje polipropilenskih drenova	47
Slika 17. Proračunski presjek slojeva	57
Slika 18. Promjena pornog tlaka s dubinom ovisno o vremenu	58
Slika 19. Stupanj konsolidacije u vremenu	59
Slika 20. Radijalni stupanj konsolidacije u ovisnosti o T_r i n	61

Popis tablica

Tablica 1: Teren na lokaciji	34
Tablica 2: Tlo na lokaciji 2	57
Tablica 3: Proračun pornih tlakova.....	58

Grafički prilozi

1. Situacijski nacrt projekta poboljšanja tla na lokaciji TS Sisak
2. Presjek kroz teren s poboljšanjem na lokaciji TS Sisak
3. Dio projekta poboljšanja tla u Rugvici
4. Dio projekta poboljšanja tla na lokaciji Ploče